

现代电子制造系列丛书

现代电子装联软钎 焊接技术

史建卫 温粤晖 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书基于对现代电子装联软钎焊技术原理的分析,阐明了焊接过程中的润湿铺展与溶解扩散两个主要过程对焊点形成的重要性,并对典型群焊技术(再流焊、波峰焊)、局部焊接技术(掩膜焊、选择焊、激光焊、热压焊等)及手工焊接技术的工艺特点、工作原理、制程设计与步骤、质量控制、常见焊接缺陷等进行了介绍;针对PCBA可制造性设计(DFM),从PCB加工制作、元器件选型与布局、焊盘设计、布线设计、PCBA安装设计等方面进行了介绍,基于焊点可靠性分析,对焊点界面的组织特征及接头形态设计提出了要求,验证了其工艺参数之间的关联性及对可靠性的影响,为高质量、高可靠电子组装提供了依据和思路。

本书既可作为中兴通讯电子制造职业学院的教学用书,也可作为相关企业员工的专业技能培训教材,还可作为高等院校相关专业师生的教材或教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子装联软钎焊接技术 / 史建卫, 温粤晖编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.1
(现代电子制造系列丛书)

ISBN 978-7-121-27596-8

I. ①现… II. ①史… ②温… III. ①电子装联—软钎焊—焊接工艺 IV. ①TN305.93②TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第274964号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 谭丽莎

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.75 字数: 429 千字

版 次: 2016年1月第1版

印 次: 2016年1月第1次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

总 序

当前，各种技术的日新月异及这个时代的各种应用和需求迅速推动着现代电子制造技术的革命。各门学科的深度融合，例如，物理学、化学、电子学、行为科学、生物学等，提供了现代电子制造技术广阔的发展空间，特别是移动互联网技术的不断升级换代、工业 4.0 技术推动着现代电子技术的高速发展。同时，现代电子制造技术将会在机遇和挑战中不断变革。例如，人们对环保、生态的需求，随着中国人口老龄化的不断加剧，操作工人的短缺和生产的自动化，以及企业对生产效率提高的驱动，将会给现代电子制造技术带来深刻变革。伴随着完全不同的时代特征、运行环境和实现条件，现代电子制造的发展也必须建立在一个崭新的历史起点上。这就意味着，在这样一个深刻的、深远的时代转折时期，电子制造业生态和电子生产制造体系的变革，为增强制造业竞争力提供了难得的机遇。

作为全球电子产品的生产大国，电子制造技术对中国无疑是非常重要的。而中兴通讯作为中国最大的通信设备上市公司，30 年来，其产品经历了从跟随、领先到超越的发展历程，市场经历了从国内起步扩展到国外的发展历程，目前已成为全球领先的通信产品和服务供应商，可以说是中国电子通信产品高速发展的缩影。在中兴通讯成功的因素中，技术创新是制胜法宝，而电子制造技术也是中兴通讯的核心竞争力。

无论是“中国智造”，还是“中国创造”，归根结底都依赖于懂技术、肯实干的人才。中兴通讯要不断夯实自身生产制造雄厚的技术优势和特长，以更好地推动和支撑中兴通讯产品创新和技术创新。为此，2013 年，中兴通讯组建了电子制造职业学院，帮助工程师进修学习新知识和新技术，不断提升工程师的技术能力。为提升学习和培训效果，我们重点下功夫编写了供工程师进修学习的精品教材。为此，公司组织了以樊融融教授为首的教材编写小组，这个小组集中了中兴通讯资深的既有丰富理论又有实践经验的专家队伍，这批专家也可以说是业界顶尖的工程师，这无疑保证了这套教材极高的水准。

“现代电子制造系列丛书”共分为 3 个系列，分别用于高级班、中级班、初级班，高级班教材有 4 本，中级班教材有 6 本，初级班教材有 2 本。本套丛书基本上覆盖了现代电子制造所有方面的理论、知识、实际问题及其答案，体现了教材的系统性、全面性、实用性，不仅在理论和实际操作上有一定的深度，更在新技术、新应用和新趋势方面有许多突破。

本套丛书的内容也可以说是中兴通讯的核心技术，现在与电子工业出版社联合将此丛书公开出版发行，向社会和业界传播电子制造新技术，使现在和未来从事电子制造技术研究的工程师受益，将造福于中国电子制造的整个行业，对推动中国制造提升能力具有深远的影响，这无疑体现了“中兴通讯，中国兴旺”的公司愿景和一贯的社会责任。

中兴通讯股份有限公司董事长

前 言

随着电子产品向多功能、微型化、高密度、环保方向发展，电子装联变得越来越重要，如何将现代电子产品可靠、高效、低廉、定制化地完成组装，已经成为现代电子装联的新课题。

现代电子装联是随着封装、印制电路板、组装材料和组装技术共同发展起来的，在这一过程中，我们面临的高密度组装及其可靠性问题必须得到重视，而且基于生产过程的工艺管理为电子装联成功与否提供了保障。

正是基于以上考量，我们根据现代电子装联在新形势下的要求，提出了编制针对专业技术人员的系列教材，以满足现代电子装联的各项要求。

《现代电子装联软钎焊接技术》首先基于对现代电子装联软钎焊技术原理的分析，阐明了焊接过程中的润湿铺展与溶解扩散两个主要过程对焊点形成的重要性；其次对再流焊接技术、波峰焊接技术及手工焊接技术等的特点、工作原理、制程设计与步骤、质量控制、常见焊接缺陷等进行了论述；再次针对 PCBA 可制造性设计（DFM）进行了介绍，为自动化组装实现高焊接质量、高直通率保驾护航；最后基于焊点可靠性分析，对焊点界面的组织特征及接头形态设计提出了要求，并验证了其工艺参数之间的关联性及对可靠性的影响，为高质量、高可靠电子组装提供了依据和思路。

本书共分 9 章，分别是：第 1 章，现代电子装联软钎焊技术；第 2 章，现代电子装联软钎焊原理；第 3 章，现代电子装联软钎焊应用材料；第 4 章，再流焊接技术；第 5 章，波峰焊接技术；第 6 章，局部焊接技术；第 7 章，手工焊接技术；第 8 章，PCBA 可制造性设计（DFM）；第 9 章，焊点接头设计及其可靠性。

本书的第 1、2、3、4、7、8、9 章由史建卫编写，第 5、6 章由温粤晖编写。

在本书编写过程中，中兴通讯股份有限公司董事长给予了大力支持、关心和鼓励，并在百忙之中为本系列丛书作序。同时，该公司执行副总裁邱未召先生和高级顾问马庆魁先生也亲力亲为，为本书的按时出版提供了指导，笔者十分感谢！

作为前辈和老师，已八十岁高龄的樊融融研究员亲自审核了全书，并为该书提出了很多好的指导、意见和建议，笔者深表感谢！

在本书的编写过程中，还得到了制造中心工艺部汪芸部长、邱华盛总工程师的关心和支持，在此表示感谢！

笔者在完成这一书稿的过程中得到了制造工程研究院工艺研究部刘哲总工程师、贾忠中资深工艺专家、制造中心工艺部孙磊资深工艺专家的指导与协助，以及吴仙仙、曾慧两位同志在文字处理方面的帮助，在此也表示由衷的感谢！

本书在编写过程中参考了一些专业书籍和网上的相关资料，在此表示衷心感谢！

编著者

2015 年 12 月于中兴通讯股份有限公司

目 录

第 1 章 现代电子装联软钎焊技术	1
1.1 概述	2
1.2 焊接与钎焊	2
1.2.1 焊接	2
1.2.2 钎焊及其分类	3
1.2.3 软钎焊技术所涉及的学科领域及其影响	3
1.2.4 软钎焊技术的基本分类	4
1.3 现代电子装联软钎焊技术的新发展	6
1.3.1 “微焊接”技术	6
1.3.2 无铅化焊接技术	8
思考题	11
第 2 章 现代电子装联软钎焊原理	13
2.1 软钎焊特点与常用术语	14
2.1.1 软钎焊连接机理	14
2.1.2 软钎焊工艺步骤	14
2.1.3 软钎焊加热方式	15
2.1.4 可焊性与润湿性	15
2.1.5 接触角与润湿角	16
2.2 润湿	16
2.2.1 固体金属表面结构	17
2.2.2 液态钎料表面现象	17
2.2.3 润湿及分类	19
2.2.4 杨氏方程 (Young's Equation)	20
2.2.5 助焊剂作用下润湿过程中的热动力平衡	21
2.2.6 润湿形式	22
2.2.7 润湿性影响因素	23
2.2.8 润湿性评定方法	27
2.2.9 常用去膜技术	28
2.3 钎料填缝过程	29
2.3.1 弯曲液面附加压力	29
2.3.2 拉普拉斯方程 (Young-Laplace)	31
2.3.3 弯曲液面对饱和蒸汽压的影响	31
2.3.4 液态钎料毛细填缝过程	32
2.3.5 液态钎料的平衡形态	36

2.4	溶解与扩散	37
2.4.1	物质间的互溶条件与界面张力关系	37
2.4.2	基体金属的溶解过程	37
2.4.3	钎料与基体金属之间的扩散	43
2.5	界面反应组织	47
2.5.1	界面层结合模式	47
2.5.2	界面层金属间化合物的形成与生长	49
2.6	钎焊接头性能及接头设计	53
2.6.1	钎焊接头性能	53
2.6.2	钎焊接头强度	53
	思考题	57
第 3 章	现代电子装联软钎焊应用材料	59
3.1	钎料合金概述及其工艺性要求	60
3.1.1	钎料合金概述	60
3.1.2	钎料合金的选择与使用	66
3.2	助焊剂概述及其工艺性要求	69
3.2.1	助焊剂概述	69
3.2.2	助焊剂的选择与使用	72
3.3	钎料膏概述及其工艺性要求	74
3.3.1	钎料膏概述	74
3.3.2	钎料膏的选择与使用	75
3.4	其他钎料形态概述	76
3.4.1	钎料丝	76
3.4.2	预成型焊片	77
3.5	无铅化兼容性问题	78
3.5.1	无铅化 PCB 焊盘表面镀层工艺要求	78
3.5.2	无铅化元器件焊端/引脚表面镀层工艺要求	81
3.5.3	从润湿性评估无铅钎料与 PCB 表面保护层之间的兼容性	83
3.5.4	从润湿性评估无铅钎料与元器件表面镀层之间的兼容性	89
	思考题	91
第 4 章	再流焊接技术	93
4.1	再流焊接工艺特点	94
4.2	再流焊接温度曲线	94
4.2.1	温度曲线的基本特征	94
4.2.2	典型温度曲线类型	96
4.2.3	加热因子	96
4.2.4	带宽与工艺窗口	98

4.2.5	温度曲线设置影响因素	100
4.2.6	温度曲线测试及优化	100
4.3	再流焊接传热技术	103
4.3.1	热传导	104
4.3.2	热辐射	105
4.3.3	热对流	105
4.4	红外再流焊接技术	106
4.4.1	红外再流焊接加热原理	106
4.4.2	红外再流焊接技术特点	106
4.4.3	红外再流焊炉结构	107
4.5	热风再流焊接技术	109
4.5.1	热风再流焊接加热原理	109
4.5.2	热风再流焊接技术特点	110
4.5.3	热风再流焊炉结构	110
4.6	红外+热风复合加热再流焊接技术	112
4.6.1	红外+热风复合加热再流焊接加热原理	112
4.6.2	红外+热风复合加热再流焊接技术特点	113
4.6.3	红外+热风复合加热再流焊炉结构	113
4.7	汽相再流焊接技术 (VPS)	114
4.7.1	汽相再流焊接加热原理	115
4.7.2	汽相再流焊接技术特点	116
4.7.3	汽相再流焊炉结构	117
4.8	再流焊炉设计参数及应用	118
4.9	无铅再流焊接工艺技术	119
4.9.1	无铅再流焊接工艺技术特点	119
4.9.2	无铅化对再流焊接温度曲线的影响	120
4.9.3	无铅化对再流焊炉的影响	121
4.9.4	有铅+无铅混装再流焊接温度曲线设置	129
4.10	再流焊接常见缺陷及防治措施	131
4.10.1	焊点脱焊	131
4.10.2	钎料膏再流不完全	132
4.10.3	润湿不良	132
4.10.4	墓碑	132
4.10.5	钎料珠	133
4.10.6	钎料球	134
4.10.7	桥连	134
4.10.8	元器件开裂	135
4.10.9	其他	136
	思考题	136

第 5 章 波峰焊接技术	137
5.1 概述	138
5.1.1 波峰焊接的定义	138
5.1.2 波峰焊接的工艺特点	138
5.2 波峰焊接中的热、力学现象	138
5.2.1 波峰焊接入口点的热、力学现象	138
5.2.2 热交换和钎料供给区的热、力学现象	139
5.2.3 波峰退出点的热、力学现象	139
5.2.4 波峰焊接过程中的温度特性	140
5.3 波峰焊接工艺窗口	141
5.3.1 助焊剂涂覆	141
5.3.2 预热温度	142
5.3.3 钎料槽温度	144
5.3.4 传输速度	146
5.3.5 传输角度	147
5.3.6 波峰高度	148
5.3.7 压波深度	148
5.3.8 冷却速度	149
5.4 波峰焊接设备结构及其性能评估指标	149
5.4.1 波峰焊接设备系统组成	149
5.4.2 波峰焊接设备性能评估指标	149
5.5 波峰焊接工艺过程控制	156
5.5.1 工艺过程控制的意义	156
5.5.2 基材可焊性的监控	157
5.5.3 波峰焊接设备工序能力系数 (C_{pk}) 的实时监控	157
5.5.4 助焊剂涂覆的监控	158
5.5.5 波峰焊接温度曲线的监控	159
5.5.6 波峰焊接中钎料槽杂质污染的危害	159
5.5.7 防污染的对策	160
5.6 波峰焊接常见焊点缺陷及防治措施	163
5.6.1 虚焊	163
5.6.2 冷焊	164
5.6.3 拉尖	164
5.6.4 桥连	165
5.6.5 金属化孔填充不良	167
5.6.6 针孔和吹孔	168
5.6.7 钎料珠和钎料球	169
5.6.8 芯吸现象	170
5.6.9 缩孔	171

思考题	171
第 6 章 局部焊接技术	173
6.1 掩膜波峰焊接技术	174
6.1.1 掩膜波峰焊接技术特点	174
6.1.2 掩膜板材料分类及特性	174
6.1.3 掩膜板设计技术要求	176
6.2 选择性波峰焊接技术	176
6.2.1 选择性波峰焊接技术特点	176
6.2.2 选择性波峰焊接技术工艺流程	177
6.2.3 选择性波峰焊接设备技术要求	178
6.3 其他局部焊接技术简介	179
6.3.1 激光焊接技术简介	179
6.3.2 热压焊接技术简介	179
6.3.3 电磁感应焊接技术简介	180
思考题	180
第 7 章 手工焊接技术	181
7.1 手工焊接工艺特点	182
7.2 手工焊接物理化学过程	183
7.3 手工焊接工具	185
7.3.1 电烙铁概述	185
7.3.2 智能电烙铁的工作原理	188
7.3.3 无铅化对电烙铁性能的影响	189
7.3.4 电烙铁的维护保养	190
7.4 手工焊接工艺操作规范	190
7.4.1 手工焊接工艺过程	190
7.4.2 手工焊接工艺操作要领	191
7.5 手工焊接工艺质量控制	194
7.5.1 手工焊接工艺参数要求	194
7.5.2 电烙铁的选择与使用	194
思考题	198
第 8 章 PCBA 可制造性设计 (DFM)	199
8.1 电子产品分类及其质量标准要求	200
8.1.1 电子产品分类	200
8.1.2 电子产品质量标准要求	200
8.2 可制造性设计 (DFM) 对电子产品质量的意义	201
8.3 可制造性设计 (DFM) 概述及主要内容	201
8.3.1 可制造性设计概述	201

8.3.2	可制造性设计内容	202
8.4	PCBA 组装方式设计	202
8.4.1	电子产品的可生产性等级	202
8.4.2	电子产品的组装方式分类	203
8.4.3	电子产品的组装方式选用原则	204
8.5	PCB 可制作性设计	204
8.5.1	布线设计的注意事项	204
8.5.2	布线设计的基本原则	205
8.5.3	电源线与地线设计要求	205
8.5.4	导线设计要求	205
8.5.5	阻焊膜设计要求	207
8.6	PCBA 可组装性设计	209
8.6.1	基准点标记	209
8.6.2	工艺边及传送方向	211
8.6.3	元器件选型	211
8.6.4	元器件布局	213
8.6.5	元器件间隔	216
8.6.6	元器件焊盘设计工艺性要求	217
8.6.7	SMT 工艺中的元器件焊盘设计示例	218
8.6.8	THT 工艺中的元器件焊盘设计示例	220
8.6.9	其他	224
	思考题	224
第 9 章	焊点接头设计及其可靠性	225
9.1	电子装联可靠性	226
9.1.1	机械可靠性	226
9.1.2	电化学可靠性	227
9.2	焊点的界面质量模型及焊点接头模型	228
9.2.1	软钎焊接焊点质量对电子产品可靠性的影响	228
9.2.2	理想焊点的界面质量模型	228
9.2.3	焊点的接头模型	229
9.3	焊接接头结构设计对焊点可靠性的影响	230
9.3.1	焊接接头的几何形状设计与强度分析	230
9.3.2	焊接接头的几何形状设计与电气特性	233
9.4	焊接接头机械强度的影响因素	236
9.4.1	钎料量对接头剪切强度的影响	236
9.4.2	与熔化钎料接触时间对接头剪切强度的影响	237
9.4.3	焊接温度对接头剪切强度的影响	237
9.4.4	接头厚度/间隙对接头剪切强度的影响	238

9.4.5 接头强度随钎料合金成分和基体金属的变化	239
9.4.6 接头的蠕变强度	240
9.5 焊接接头三要素与焊点可靠性	241
9.5.1 焊点可靠性的影响因素	241
9.5.2 可焊性对焊点可靠性的影响	243
9.5.3 可焊性的存储期试验及其方法	244
9.6 焊点可靠性评估方法	247
思考题	248
参考文献	249
跋	251

第1章 现代电子装联软钎焊技术



本章要点



概述



焊接与钎焊



现代电子装联软钎焊技术的新发展



1.1 概 述

电子产品一般分为半导体芯片、电子元器件、电路组件（部件）、整机和系统等形式。为了正确认识和把握不同产品的制造特点，电子产品的制造过程被划分成不同层次或阶段进行研究，封装概念随之采用。根据电子产品的功能特征和制造特点，封装一般分为零级封装（裸芯片级）、一级封装（元器件级）、二级封装（板卡级）和三级封装（系统级）四个等级。在实际生产中，微电子行业一般将零级封装和一级封装称为电子封装（Electronics Packaging），主要是指半导体的制造过程，是微电子技术的核心和发展最为活跃的部分。二级封装也常称为电子装联或组装过程，主要是形成板卡级的电路功能模块。三级封装则是产品的最终装配过程。

因此，电子装联技术（Electronics Assembly Technology）主要涉及工业生产条件下进行的二级封装技术。它是一项根据电路设计要求，将电子元器件准确、可靠地安装在印制电路板上，从而形成符合一定电气与机械连接要求的电路模块的制造技术。近年来，随着装联技术的发展，二级封装也已开始直接采用裸芯片进行装联，这使得一级封装和二级封装之间的界限开始变得模糊起来。目前，几乎所有的电子产品都包含了板卡级（二级封装）的电路模块。因此，电子装联技术成为现代电子产品制造中一项必不可少的基本过程，占有极其重要的作用。

1.2 焊接与钎焊

1.2.1 焊接

电子装联技术中的“装”表示安装，主要包括结构零部件的安装（螺装、铆接和胶接）和电气元器件的安装（THT 插装、SMT 贴装），“联”表示互联，即将电路元器件互联成电流通路的过程。完成此过程的工艺手段以焊接和压接两种居多，由于焊接不但在宏观上建立了永久性的联系，在微观上也建立了组织之间的内在联系，所以成为电子装联材料连接的主要方法。

焊接是将两种或两种以上的（同种或异种）材料通过原子或分子之间的结合和扩散造成永久性连接的工艺过程，涵盖了熔化焊接、固相焊接和钎焊，其中熔化焊接大多用于金属结构件的连接，如图 1.1 所示。表 1.1 为三类焊接技术特征的对比。

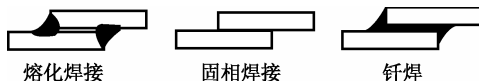


图 1.1 焊接接合部的结合形式



表 1.1 三类焊接技术特征的对比

方法	母材受热	填充材料	热源	压力	接头拆卸性	结合特征
熔化焊接	熔化	有或无	外加	无	不可拆卸	冶金结合
固相焊接	不熔化	无	内部或外加	有	不可拆卸	冶金结合
钎焊	不熔化	有	外加	无	部分可拆卸	冶金结合

1.2.2 钎焊及其分类

钎焊是指在固体金属（母材或基体金属）与固体金属之间，溶入比固体金属熔点低的钎料（填充金属或合金），靠毛细管作用使其填充并进入金属间隙中，靠润湿和扩散作用获得连接强度的冶金连接方法，其特点是钎料熔化，而母材金属不熔化。

钎焊被区分为硬钎焊和软钎焊，美国钎焊学会将 450°C 作为分界线，规定钎料液相线温度高于 450°C 所进行的钎焊为硬钎焊，低于 450°C 的为软钎焊。ISO 标准规定，以金属钎料熔点 450°C 为界限来区别硬钎焊和软钎焊，其中又把熔点低于 450°C 的填充金属（Sn 基钎料）、靠润湿作用达到连接目的的冶金连接方法称为软钎焊（俗称锡焊）。

在电子行业中，绝大多数的钎焊工作是在 300°C 以下完成的。在电子装联过程中，当使用 Sn 基钎料焊接 Cu 和 Cu 合金时，钎料会在金属表面产生润湿，钎料中的 Sn 就会向基体金属中扩散，在界面上形成合金层，即金属间化合物（IMC），使两者结合在一起。接合处形成的合金层，因钎料成分、母材材质、加热温度及表面处理等不同而不同。关于焊接获得连接强度的机理，比较流行的学说解释包括扩散理论、晶格渗透理论、中间合金理论、润湿合金理论、机械啮合理论等。

在整个电子产品的装联过程中，软钎焊的权重可达 70% 以上，它对电子产品的整体质量和可靠性有着特殊的意义。

为照顾目前电子组装行业已流行的习惯叫法，本书中特将软钎焊称为焊接。

1.2.3 软钎焊技术所涉及的学科领域及其影响

软钎焊技术是一项综合性的系统工程。它涉及的学科是多方面的，它们各自通过其对可焊性、焊接接合部的腐蚀性、焊接强度等因素而最终影响焊接的可靠性，如图 1.2 所示。

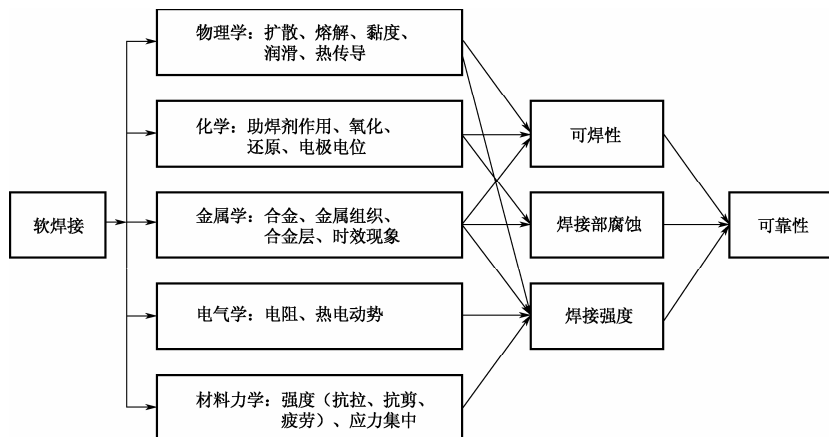


图 1.2 软钎焊涉及的学科领域及影响



构成软钎焊的基本要素是母材（基体金属）、钎料和钎剂（助焊剂）。在软钎焊中，它们相互作用和影响过程，如图 1.3 所示（提示：为了区别硬钎焊，后续章节涉及的软钎焊的基本要素将以基体金属、钎料和助焊剂的形式出现）。

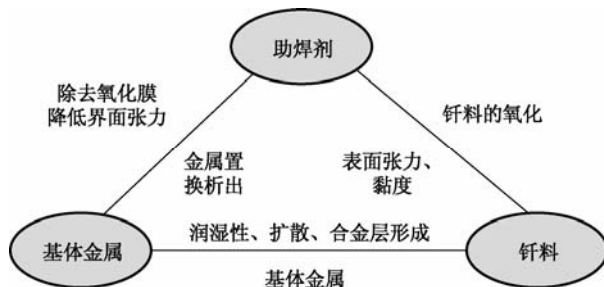


图 1.3 基体金属、钎料、助焊剂的相互反应

在电子工业中，相对于其他连接技术，软钎焊技术由于以下几方面的原因而居于主导地位。

首先是软钎焊的应力匹配能力。软钎料在室温下通常是塑性优良的自退火合金，没有加工硬化等问题，能吸收应力。这种独特的特性使得这种工艺能将不同膨胀系数、不同刚度水平和不同强度等级的材料连接到一起。例如，普通印制电路板的设计与制造几乎违背了所有的结构设计原则，如果不是由于软钎焊连接具有这种应力匹配能力，印制电路板可能就不会存在了。

其次，软钎焊具有显著的优越性、高效性和可靠性。由于连接是在相对较低的温度下完成的，许多常规有机高分子材料和电子元件因受热而改变性能和被破坏等问题得以有效地避免。并且，相对低成本的材料、简单的工具和可控的工艺使得软钎焊具有特别明显的积极性和高效性。

最后，软钎焊具有制造和修理的方便性。与其他冶金连接方法相比，软钎焊是对操作工具要求相对简单和易于操作的工艺，并且由于软钎焊头是可以“拆卸”的接头，或者说软钎焊过程是“可逆”的，因而使得软钎焊连接的修补十分简单方便。另外，修补过的接头可以像原始接头一样可靠。可以预料，只要我们还使用由导体、半导体和绝缘体等构成的基于电脉冲的电路，软钎焊技术就是必不可少的。

1.2.4 软钎焊技术的基本分类

1. 群焊技术

群焊一词可追述到 20 世纪 40 年代号称供应美国电装焊接设备需求 40% 的霍利斯公司（Hollis）早期的波峰焊接技术。群焊是指对印制电路板上所有的待焊点同时加热进行软钎焊的方法。

电子元件、裸印制电路板或部分装配的印制电路板、助焊剂、熔融焊锡、锡膏、预成型焊片及胶类，每一种物料都有其自身的物理与化学特性，可通过一个单一且不可逆转的步骤来实现正确的相互作用，形成可靠的装配。

群焊技术主要包括浸焊技术、波峰焊接技术与再流焊接技术。群焊技术的特点主要是组件受热均匀，变形小，生产效率快，焊接质量可靠。浸焊技术与波峰焊接技术的焊接时间短，



对组件的热冲击较小,但需要较大的钎料槽,熔融焊锡容易氧化,且易受杂质污染,易产生焊接缺陷,如夹渣、桥接、焊点暗淡或粗糙、润湿不良等,一般应用于引脚间距较大、组装密度不高的产品。再流焊接技术成熟,自动化程度高,焊点缺陷率极低,可进行细间距、高密度组装,但对组装材料的性能要求高,且工艺管控严格。

2. 局部焊接技术

随着混装技术的出现,许多电子产品组件同时使用了表面贴装元器件和通孔插装元器件。当出现双面混装,即表面贴装元器件与通孔插装元器件引脚焊接面共面时,由于两种元器件的工艺特性不同,采用群焊技术将无法完成可靠焊接。

通孔再流焊接工艺是通过表面贴装工序对通孔(Pin Through Hole, PTH)元器件进行组装的一种新技术。应用于通孔再流焊接工艺的 PTH 元器件封装材料必须能耐再流焊接高温,且引脚端部大多具有一定锥度以防插装时带走大量钎料。相对于标准再流焊接工艺而言,通孔再流焊接工艺的核心在于钎料膏涂布技术,即首先对通孔填充钎料膏量进行计算,然后采用阶梯模板或扩大开口设计等印刷工艺释放足够钎料膏量,再进行贴片及再流焊接。近年来,此工艺技术发展较快,在一些高可靠性产品上已成功应用。

除此之外,目前行业内多采用局部焊接技术对所需焊接的 PTH 元器件引脚进行加工,常用方法包括掩膜波峰焊接技术、选择性波峰焊接技术、局部浸焊焊接技术、自动烙铁焊接技术、激光焊接技术等。

随着新材料、新器件的不断出现,以及高密度复杂产品组装时,部分表面贴装元器件也必须采用局部焊接技术,常用焊接方法包括激光焊接技术、热压焊接技术、电磁感应焊接技术等。同时,对于部分表面贴装元器件(如 BGA 及 QFP)进行返修时,为提高成功率及可靠性、减少对基板的损伤,也需采用局部加热技术,如专用返修台,通过热风、红外或热板等方式对产品进行局部加热以完成拆焊及重新组装。

3. 手工焊接技术

手工焊接是传统的焊接方法,虽然批量电子产品生产已较少采用手工焊接了,但在电子产品的维修、调试中不可避免地还会用到手工焊接。其焊接质量的好坏也直接影响到维修效果。手工焊接是一项实践性很强的技能,当了解其一般方法后,只有多练、多实践,才能取得较好的焊接质量。表面贴装手工焊接有时比通孔(Through Hole)焊接更具挑战性,因为它要求更小的引脚间距和更高的引脚数。在返修工艺中必须小心,不要让印制电路板过热,否则电镀通孔和焊盘都容易损伤。

手工焊接技术主要包括接触焊接与热风焊接。

接触焊接是在加热的烙铁嘴或环直接接触焊接点时完成的。烙铁嘴或环安装在焊接工具上。烙铁嘴用来加热单个焊接点,而烙铁环用来同时加热多个焊接点。对于单个烙铁嘴,有多种设计结构。对于环形式的烙铁嘴,也有多种设计结构。比如有两或四面的离散环,主要用于元件的拆除。环的设计主要用于多脚元件,如集成电路(IC);但是它们也可以用来拆卸矩形和圆柱形的元件。烙铁环对取下已经用胶粘结的元件非常有用。当钎料熔化后,烙铁环可拧动元件,打破胶的连接。当用烙铁环焊接四边引脚器件时,很难同时接触所有的引脚。



如果烙铁环不接触所有引脚,则不会发生热传导,这意味着一些焊点不熔化,特别是在 J 型引脚元件上,这种情况在操作员取下元件时很容易将 PCB 焊盘损坏。

热风焊接通过用喷嘴把加热的空气或惰性气体,如氮气,指向焊接点和引脚来完成。热风设备选项包括从简单的手持式单元加热单个位置,到复杂的自动单元设计加热多个位置。手持式系统用于取下和更换矩形、圆柱形和其他小型元件。自动系统用于取下并更换复杂元件,诸如密脚和面积排列元件。热风系统避免了使用接触焊接系统可能引发的局部热应力,这使它成为均匀加热是关键的应用中的首选。热风温度范围一般是 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 。熔化焊锡所要求的时间取决于热风量。较大的元件在可取下或更换之前,可能要求超过 60s 的加热。喷嘴设计很重要;喷嘴必须将热风指向焊接点,而且有时要避开元件本体。热风加热相对低的热效率不会产生较大的热冲击,对如陶瓷电容等元件来说是一个优点。同时,热风作为传热媒介,消除了烙铁嘴等直接接触的必要,且温度和加热率在一定范围内可控、可重复和可预测。

手工焊接的使用材料包括助焊剂、钎料丝及钎料膏。助焊剂通常使用小瓶滴涂或助焊剂笔施加;钎料丝通常可手动送丝或借助送丝装置送丝;钎料膏通常使用注射器来施加。表面贴装焊接通常要求较小直径的锡线,典型的在 $0.50\sim 0.75\text{mm}$ 范围;通孔焊接通常要求较大直径的锡线,范围为 $1.20\sim 1.50\text{mm}$ 。

1.3 现代电子装联软钎焊技术的新发展

1.3.1 “微焊接”技术

1. “微焊接”技术迅速发展

随着高密度面阵列封装器件(uBGA、CSP、FCOB 等)和微型器件(0201、01005 和 EMI 等)在工业中的大量应用,“微焊接”技术在高密度组装中越来越发挥更大的作用。其特点如下。

(1) 焊点大小越来越微细化

- 小间距 CSP、0201、光电子等在 PCBA 上的应用已成为热门技术。如何处理在 CSP 和 0201 组装中常见的网板超小开孔($\leq 0.25\text{mm}$)问题,就是钎料膏印刷工艺前所未有的基本物理问题。
- 芯片级封装具有封装密度高的特点,间距为 0.4mm 的 CSP 的钎料球直径 $\leq 0.20\text{mm}$ 。
- CSP 可以有 4 种基本特征形式,即刚性级、柔性级、引线框架级和晶片级规模。CSP 组装工艺的一个问题就是焊接互联的键合盘很小,通常 0.5mm 间距的 CSP 的键合尺寸为 $0.25\sim 0.275\text{mm}$ 。如此小的尺寸通过面积比为 0.66 甚至更低的开口印刷钎料膏是很困难的。模板开口太小则钎料膏易被堵塞导致钎料不足,而 CSP 的故障一般与钎料疲劳开裂有关。



- 0201 一推出就与 CSP 一起被组装到电话中, PCB 的尺寸由此至少减少一半, 间距孔可小至 0.15mm。要想减少工艺后缺陷(如桥接和立碑)的出现, 焊盘尺寸优化和器件间的间距是关键。

(2) 光电子器件的应用

板级光电子组装正广泛应用于高速数据传送的电信和网络领域, 其工艺非常精细, 典型封装昂贵而易损坏, 必须小心处理, 以免引线在成型操作过程中损坏或引线和器件体连接接口处的模块封装断裂。

2. “微焊接”技术的工艺特征

顾名思义, “微焊接”就意味着接合部(焊点)的微细化, 小间距的焊点数急剧增加, 结合的可靠性要求更高。归纳起来, “微焊接”技术正面临着下述几个基本课题。

① 由于人手不可能直接接近, 所以“微焊接”工艺基本上属于一种“无检查工艺”。为了实现无检查工艺的目的, 必须建立确保焊点接触可靠性的保证系统(对制造系统的要求)。

② 由于焊点的微细化, 必须确保焊接接合部自身的接触可靠性。为此要求有最完全的接合, 焊点内的任何空洞、异物等都会成为影响连续可靠性的因素(对接合部构造的要求)。

③ 为避免 PCB 过度弯曲, 在再流焊炉里适当支撑 PCB 是很重要的。再流焊接过程中由热引起的 BGA 封装或基板的翘曲会导致钎料空缺, 并把大量残留应力作用在钎料连接上, 造成早期故障。采用莫尔条纹投影影像系统很容易描述这类翘曲。

④ 焊盘设计包括形状、大小和掩膜界定, 对于可制造性和可测试性及满足成本方面的要求都至关重要。

⑤ 板级可靠性主要取决于封装类型, 而 CSP 平均能经受 $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$ 的热循环周期 800~1200 次, 无须进行底部填充。

3. “微焊接”组装工程要求

面对目前大量出现的微小型化的新型封装所带来的焊点微细化, 传统焊点的质量检测方法已经失去了其作用和价值。然而微焊点的质量模型还待进一步探索, 焊点可靠性设计的评价方式还在初步尝试, 目前通常采用计算机模拟技术来进行, 若仅从焊点结构来看并不复杂, 但生产现场不同工序组合因素可能是产生质量问题的原因, 因为现场管理本身就是一种主要因素。

为了实现上述要求, 必须引入“微焊接工艺设计”的思维方法。所谓“微焊接工艺设计”, 就是用计算机模拟焊接接合部的可靠性设计, 从而获得实际生产线的可靠性管理措施和控制项目; 对生产线可能发生的不良现象进行预测, 进而找出预防不良现象发生的措施, 这就是进行“工艺设计”的目的。

“工艺设计”的作用是在设计阶段对现场可能发生的各种不良进行预测, 也就是在设计阶段就采取必要的防止措施。“工艺设计”的好坏直接关系到生产效率的提高和产品质量的合格率。可以认为, “工艺设计”的目的是将各种不良因素消灭在生产开始之前。

通过“工艺设计”预先构筑了实际的生产线和生产管理系统模型, 这样就可以获得高的



生产效率和焊接质量，对焊接接合部的质量管理也就变得容易和可能了。

4. “微焊接”工艺设计顺序

“微焊接”技术中的生产现场管理的项目很多，真正进入微焊接时需管理的工艺因素可能还会复杂一些，这是因为在建立生产质量能够得到保障的表面组装生产线时，不仅要到现场发生的所有不良加以预测，而且要配备相应的现场纠正措施和对策，这也说明了表面组装生产线与其他生产线的不同含义与重要性。

“微焊接工艺设计”分为焊点可靠性设计、PCB 焊盘设计和印刷模板开口部设计 3 大类，其中焊点可靠性设计又包括确定焊料种类和材料特性、确定外部负荷、确定焊点形状、设定可靠性管理项目 4 个步骤。

各种不同的表面组装元器件焊接后形成不同形状的焊点，当利用计算机针对不同形状的焊点进行可靠性设计时，首先应考虑现场的变动因素，如可将钎料膏印刷偏差、元件贴装位置偏差、焊点弯月面形状变化等变量提供给计算机，再根据各种变量可能造成的可靠性影响确定必需的管理范围，设定可靠性管理项目，并利用计算机模拟技术预先进行各种内容的研究。

1.3.2 无铅化焊接技术

1. 无铅化电子装联的必然性

传统 SnPb 钎料（特别是 Sn37Pb）因其低廉的成本、良好的导电性、优异的钎焊性能和力学可靠性能，一直以来广泛应用于电子整机装联、微电子元器件封装、印制电路板级封装、表面组装及电子元器件的钎焊工艺中^[1]。但是铅及含铅化合物是危害人类健康和污染环境的有毒有害物质，美国环境保护署（EPA）将铅列入前 17 种严重危害人类寿命与自然环境的化学物质之一。SnPb 钎料在生产及使用过程中会直接危害人体，它与人体的血红蛋白强烈结合会抑制人体正常的生理功能，造成神经系统和新陈代谢紊乱，致使神经系统和生理反应迟钝，并减少血色素，进而造成贫血及高血压。此外，电子元器件废弃物中的铅会被氧化成氧化铅，而氧化铅和盐酸及酸雨中的酸反应会形成铅的化合物，污染环境，最终危害人类的健康。同时，由于电子封装与组装的迅速发展和技术的不断进步，对钎焊性能的要求不断提高。随着现代高集成度、高性能电子电路设计的发展，焊点越来越小，所需承载的力学、电学和热学负荷越来越重，对其可靠性要求也日益提高。因此，传统 SnPb 钎料已不能满足电子工业对其可靠性的要求。

在无铅化电子组装的发展历程中，最有影响力的即为 2003 年 2 月 13 日，欧盟官报 OJ L037 正式公布：历经 5 年讨论的 WEEE（Waste from Electrical and Electronic Equipment）和 RoHS 指令正式开始生效。其核心内容之一就是自 2006 年 7 月 1 日起，在欧洲市场上销售的电力电子产品必须为无铅产品；同时，各成员国必须在 2004 年 8 月 13 日之前完成相应的立法工作。这给各国进出口贸易造成了一定的技术壁垒，我国政府积极采取相关措施，原信息产业部《电子信息产品生产污染防治管理办法》草案规定：电子信息产品制造者应当保证，自 2003 年 7 月 1 日起实行有毒有害物质的减量化生产措施；自 2006 年 7 月 1 日起投放市场的国家重点监管目录内的电子信息产品不能含有铅、汞、镉、六价铬、聚合溴化联苯（PBB）



或者聚合溴化联苯乙醚 (PBDE) 等。此外,随着社会的发展,人们对生存环境和其可持续发展越来越重视,环保意识也逐渐增强。工业废弃品中的铅通过渗入地下水会进入动物或人类的食物链,对人体造成很大的危害性,这就要求限制铅的使用。环保产品越来越受到人们的欢迎,许多国际知名公司主动生产打着绿色环保标志的无铅产品,从而获得了巨大利润。例如,世界上第一个批量生产的无铅化电子产品——松下 MD Player 推出市场后,使松下公司在此类产品中的市场占有率从 5% 提高到了 15%。无铅化电子组装已经是国际信息产业工业发展的必然趋势。

2. 无铅化焊接的工艺特点

为了找到一种 SnPb 钎料的替代产品,从 20 世纪 90 年代起,无铅钎料的研发已成为世界的关注热点,国际上相继组织了多次大型研发活动。无铅化电子组装中应用的无铅钎料开发,其技术的关键在于找到一种或几种合金元素,使其与 Sn 形成的合金具有近似的熔点,从而不必改变现有工艺条件而实现即时替代,同时其润湿性能应与 SnPb 合金相当。国外对无铅钎料的研究大多数集中在其熔点与常用共晶 SnPb 钎料相近的含锡二元、三元以至多元合金上,它们多以含锡二元共晶为基础,添加适量的其他元素 Ag、Zn、Cu、Sb、Bi、In 达到细化焊点组织、调节钎料温度区间、改善可焊性、提高焊点性能的目的。经过大量研究,最终得到的无铅钎料主要集中在 SnAg、SnCu、SnIn、SnSb、SnBi 和 SnZn 等几大体系上。从可焊性、抗氧化性、成本、毒性、废弃物回收及资源供应方面考虑,这几种无铅钎料中最适合作为 SnPb 钎料替代产品的为 SnAg、SnCu、SnAgCu 三大合金系列,其中波峰焊接中应用最广的为 SnCu、SnAgCu 两大系列,再流焊接中应用最广的为 SnAg、SnAgCu 两大系列。

无铅化焊接给传统装联工艺带来了很大挑战。首先,目前广泛应用的几种无铅钎料的熔点比传统 SnPb 钎料的熔点高出 30~40℃ 左右,为保证钎料熔化后具有良好的润湿性,一般要求焊接峰值温度高出钎料熔点 20~40℃,这就导致无铅化后的焊接峰值温度高达 250℃ 左右(见表 1.2),再流焊接工艺温度曲线随之发生变化,预热温度和再流峰值温度相应升高(见图 1.4)。

表 1.2 SnPb 钎料与无铅钎料的工艺特点

钎料膏	熔点 (°C)	钎焊峰值温度范围 (°C)
Sn.37Pb	183	208~235
Sn.3.5Ag	221	242~262
Sn.3.0Ag.0.5Cu	217~219	242~262

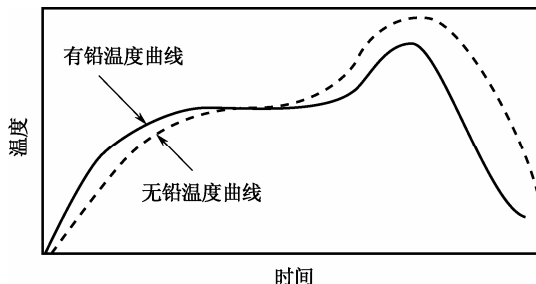


图 1.4 SnPb 钎料与无铅钎料的典型再流焊接温度曲线



其次，无铅钎料的润湿性要弱于传统的 SnPb 钎料（见图 1.5），加上高温对焊盘和高含锡量无铅钎料的氧化作用，很容易导致焊点润湿不良，产生许多焊后缺陷，影响焊点质量和可靠性。

传统 SnPb 钎料的温度工艺窗口一般为 210~230℃，而 SnCu、SnAg、SnAgCu 无铅钎料的温度工艺窗口一般为 240~260℃，无铅化后所需高温通过提高波峰焊接或再流焊接设备的加热温度很容易得到解决。对于无铅钎料的润湿性差、易氧化问题，国内外研究学者正努力通过改变助焊剂的化学性能来予以改善。根据氧化膜学说，无铅钎料的主要合金元素能够形成比 Pb 的氧化物更加稳定的氧化物（见表 1.3），因此通过助焊剂去除焊材表面的氧化膜比较困难。

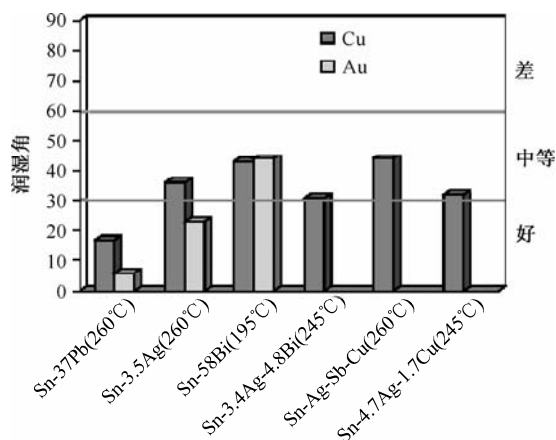


图 1.5 SnPb 钎料与无铅钎料的润湿角评定

表 1.3 钎料氧化物的标准自由能

化合物	标准吉布斯自由能 ($G_{f,T}^0$ (kJ/gatomO))			
	298K	400K	500K	600K
Bi_2O_3	-165.7	-156.5	-147.7	-138.3
SnO_2	-260.2	-249.7	-239.7	-228.8
PbO	-188.8	-178.8	-168.7	-159.5
ZnO	-318.6	-312.8	-298.5	-288.9
Ag_2O	-10.5	-3.8	2.5	8.8
CuO	-129.4	-119.7	-111.0	-101.7

目前，国内外电子整机业都倾向于采用在氮气气氛中钎焊来防止氧化，改善液态合金的表面张力，提高钎料的润湿性，优化生产工艺。另外，由于电子工业中用于树脂类软助焊剂清洗的清洗剂通常为 CFC113（三氟三氯乙烷），这种清洗剂对大气臭氧层有破坏作用，因而在 1987 年，包括美国和欧共体成员国在内的 24 个国家签署了控制使用 CFC 化合物的蒙特利尔协议来限制 CFC 类物质的使用，进而使得免清洗助焊剂逐渐成为主流。免清洗助焊剂大约含 2.1~2.8% 的固体含量，活性比较低，在组装工艺中通过惰性化来配合使用，常采用氮气保护。无铅化焊接技术及免清洗装联工艺将成为今后的发展趋势。









思 考 题

1. 软钎焊技术的基本要素是什么?
2. 软钎焊技术的基本分类如何?
3. 无铅化焊接技术的工艺特点有哪些?

第2章 现代电子装联软钎焊原理



本章要点

-  软钎焊特点与常用术语
-  润湿
-  钎料填缝过程
-  溶解与扩散
-  界面反应组织
-  钎焊接头性能及接头设计



2.1 软钎焊特点与常用术语

2.1.1 软钎焊连接机理

软钎焊过程与在固相、液相、气相进行的还原和分解、润湿和毛细流动、扩散和溶解、固化和吸附、蒸发和升华等物理化学现象的综合作用有关。而元素的电子结构、原子半径比、电负性状态、化合价和离子化趋势是决定形成接头时固液金属间相互作用性质的主因。与之相应的软钎焊可分为三个基本过程：一是助焊剂的填缝过程，预置的助焊剂进入基体金属间隙，并与基体金属表面的氧化物发生物理化学作用，从而去除氧化膜、清洁基材表面，为钎料填缝创造条件；二是钎料的填缝过程，随着加热温度的继续升高，钎料开始熔化并润湿、铺展，同时排除助焊剂残渣；三是钎料与基材相互作用的过程，在熔化的钎料作用下，小部分基材金属原子溶解于钎料，同时钎料原子扩散进入基材中，在固液界面还会发生一些复杂的化学反应。当钎料填满间隙、保温一定时间后，开始冷却凝固形成钎焊接头。

当两个基体金属用钎料连接在一起时，由于钎料分别和两个基体金属连接在一起形成两个连接界面，从而建立了金属的连续性，这种金属间的连接称为冶金连接。每个焊点至少有两个这样的连接界面。从基体金属 A 到基体金属 B 的金属连续性结构主要为：基体金属 A → 基体金属 A 与钎料的连接界面 (a) → 钎料 → 钎料与基体金属 B 的连接界面 (b) → 基体金属 B，如图 2.1 所示。实际上，为了理解焊接的基本过程，只需要考察其中一个连接界面的形成过程就够了。

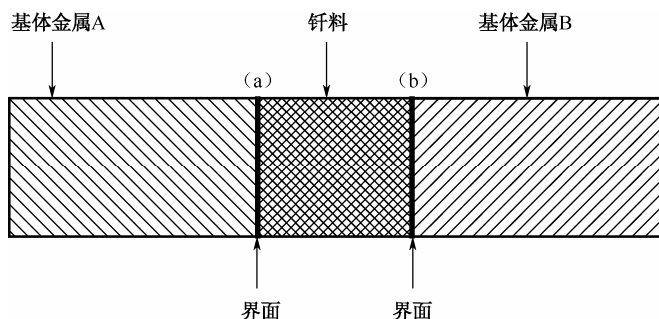


图 2.1 连接界面

2.1.2 软钎焊工艺步骤

软钎焊工艺主要包括以下内容。

- ① 被焊材料的表面处理：包括清除油污、氧化膜等，有时还需要进行表面镀覆各种有利于焊接的金属。
- ② 装配和固定：保证被焊材料间的相互位置不变。
- ③ 钎料和助焊剂位置的最佳配置：使得液态钎料能够在纵横复杂的钎缝中获得最理想



的走向。

- ④ 正确选择钎焊工艺参数：包括温度、升温速度、保温时间、冷却速度等。
- ⑤ 钎焊后的清洗：除去可能引起腐蚀的助焊剂残留物或影响焊点外形的堆积物。
- ⑥ 必要时，焊点连同整个被焊材料还要进行焊后涂覆防护等，以提高可靠性。

本书主要讲述波峰焊接、再流焊接、局部焊接及手工焊接的工艺步骤，因工艺方法不同，实际软钎焊工艺步骤可根据其特点而发生变动。

2.1.3 软钎焊加热方式

一切能够使被焊材料按照一定条件升温的热源均可用于软钎焊加热。电子工业中软钎焊加热的方式主要有金属浴加热、蒸气浴加热、气相加热、电阻加热、电烙铁加热、电炉加热、火焰加热、光束加热、红外线加热、激光束加热、电子束加热、电磁感应加热等，本书主要讲解金属浴加热（波峰焊接）、气相加热（热风再流焊接）、蒸气浴加热（汽相再流焊接）、激光束加热（激光再流焊接）和电烙铁加热（烙铁焊接）。

2.1.4 可焊性与润湿性

可焊性（Solderability）是指材料易于进行软钎焊连接的能力，即在一定焊接条件下，基体金属在组装中是否易于获得优良焊接接头的能力或焊接的难易程度。对于那些易于实现软钎焊连接的材料，常称之为可焊性优良的材料，易于采用一般的焊接方法和工艺，不易产生裂纹、气孔等缺陷，焊接接头有一定的力学性能。反之，则认为其可焊性不佳。

可焊性的优劣，在很大程度上取决于基材—钎料体系的湿润状态。一般来说，如果钎料对基材的湿润性能良好，则可焊性通常也比较好。因此，人们习惯于用润湿情况来评价和表明可焊性。润湿性是两种材料亲和性好坏的一种量度，如 PCB 焊盘铜箔本来是可焊的，然而由于固体金属表面存在原子不饱和的力场，故极易被污染，在铜箔表面形成锈膜或阻挡层，使表面能减小，从而导致润湿性不良，使基体金属变得不可焊。因此，润湿性是形成优良焊点的基本前提。润湿的程度可以用钎料在基体金属上的接触角来表征。当接触角 $\leq 90^\circ$ 时，认为焊点是合格的；当接触角 $> 90^\circ$ 时，则认为焊点不合格（见图 2.2）。

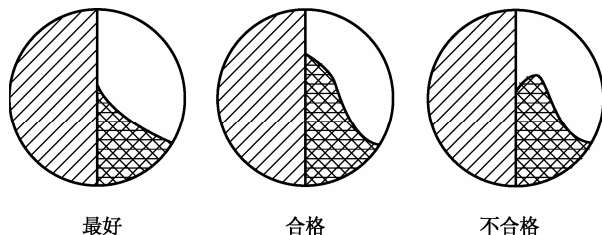


图 2.2 合格与不合格焊点的接触角

润湿性（Wettability）是固体界面由固—气界面转变为固—液界面的现象。固体的润湿性用接触角表示，当液滴滴在固体表面时，润湿性不同可出现不同形状。进行电子产品的焊接时，基材表面的氧化物在加热过程中会被助焊剂去除，从而改变基材表面润湿性而利于焊接。加热不仅会使助焊剂活化，而且会使钎料的表面张力减小，使润湿作用增强。如果基材与钎



料之间没有良好的润湿作用,将导致不润湿或反润湿。图 2.3 给出了元器件引线在 PCB 焊盘表面润湿良好时所形成的焊点形态,接触角 $<90^\circ$,并且在焊盘上会留下均匀光滑的钎料层。图 2.4 给出了所谓的反润湿(或称润湿回缩)焊点形态,已铺展开的液态钎料回缩,使其面积趋于最小,接触角增大。

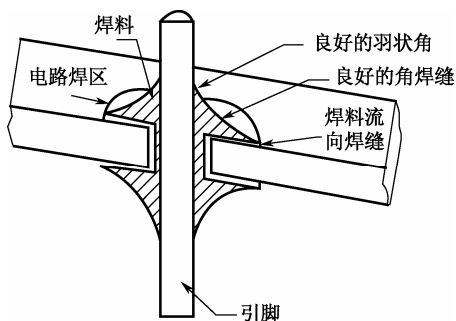


图 2.3 引线良好润湿时的焊点形态示意图

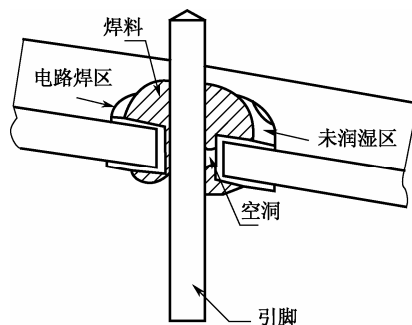


图 2.4 反润湿示意图

造成焊点润湿不良的原因主要有以下两方面:一是基材表面的氧化物未被助焊剂去除干净,使得钎料难以在这种表面上铺展;二是钎料本已良好润湿基体金属,但由于工艺不当(如加热时间过长或温度过高等),使得基材表面易于被钎料润湿的金属镀层完全溶解到液态钎料中,并裸露出来不易被钎料润湿的基体金属表面,或是由于钎料与基体金属相互作用,形成了连续的不易被钎料润湿的化合物相。

值得注意的是,湿润性与可焊性不是完全等同的,如某种钎料在某基体金属上的湿润性能极佳,湿润角接近于零度,但在钎焊时却可能由于其过分分散而不能保持在焊接间隙中,从而不能形成良好的焊点。

2.1.5 接触角与润湿角

在液体的表面张力作用下,液滴与接触平面之间的切线与接触面之间的夹角为接触角;在表面活性剂的作用下,由于表面张力下降,接触角变小,变小后的接触角为润湿角。接触角是用来衡量润湿性好坏的量度。习惯上,在未经特别指明时,通常所说的接触角也指润湿角。

润湿角一般用来评估基材表面被润湿的性能,评判标准详见 2.2.4,在此不再详述。

2.2 润 湿

焊接时焊点形成的基本过程取决于钎料和基体金属结合面间的润湿作用,也正是基体金属在被熔融钎料的润湿过程中形成了结合界面。因此,焊接过程中的润湿具有特别重要的意义,它揭示了焊接接头的原子结构和产生连接强度的原因。

要想充分把握焊接机理,必须理解润湿过程的热力学问题。润湿是一种表面现象,当熔融的钎料在金属表面留下连续的持久的膜层时,就可以说金属表面被润湿了。钎料能润湿金属表面是由于原子之间的吸引力,它们之间的反应也包括钎料元素与基体金属彼此间的相互扩散。



2.2.1 固体金属表面结构

固体金属表面结构如图 2.5 所示,其最外层表面为 $0.2\sim 0.3\text{nm}$ 的气体吸附层。随着金属性质的不同,吸附气体的种类和厚度有一定的差别,一般主要吸附的是水蒸气、氧、二氧化碳和硫化氢等气体。其次表层为 $3\sim 4\text{nm}$ 厚的氧化膜层,常由氧化物的水合物、氢氧化物和碱式碳酸盐等成分组成。其中致密氧化膜呈低结晶态,能保护基体金属免于进一步氧化,如 CuO ,而疏松氧化膜多孔,不能隔绝空气避免再氧化,如 Cu_2O 。在氧化膜之下是一层厚度约为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 厚的微晶组织,其下层是 $1\sim 10\mu\text{m}$ 的变形层,这一层则是金属在成型加工时所形成的晶粒变形的结构。通常表面能较低的亲氧的组元在固态情况下也会扩散并富集于表面,形成复杂多元组成的表面膜,并且随着存储期的延长还会进一步增厚。

焊接过程中所涉及的基体金属表面都会有一层上述的表面结构。为使钎焊过程得以顺利进行,需要根据膜的基本性质,采用酸或碱等来去除。经过清洗的表面仍不是理想表面或清洁表面,它在焊接前还可能氧化并形成一层较薄的氧化膜。

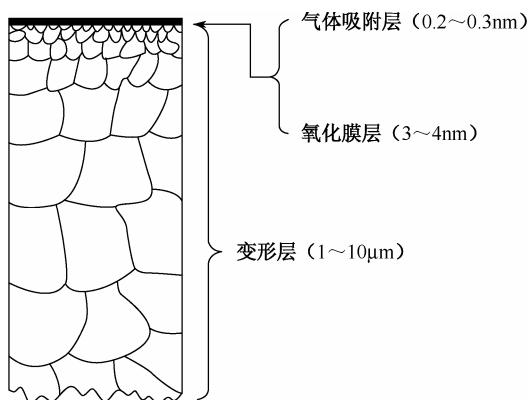


图 2.5 固体金属表面结构

2.2.2 液态钎料表面现象

液态钎料液面下的厚度约等于分子作用半径的一层液体叫作液态钎料的表面层。表面层内的分子,一方面受到液态钎料内部分子的作用,另一方面也受到液面外部气体分子的作用,如图 2.6 所示。由于气体分子的作用力比较小,所以在钎料液体的表面层中,每个分子都受到垂直于液面并且指向液体内部的不平衡力,如图 2.7 所示。

因此,要想把一个分子从液体内部移到表面层内,就必须反抗这个力做功,从而增加了这一分子的位能,也就是说,分子在表面层内比在液态内部有较大的位能,这项位能叫作表面能。当系统处于稳定平衡时,应有最小的位能,因此液态钎料表面的分子有尽量挤入液体内部,尽可能缩小其表面面积的趋势。因为液体表面面积越小,位能越小,所以在宏观上看液态钎料表面就好像是一层拉紧了弹性膜,使其表面受到一个收缩倾向的力作用,该力就称为液态钎料的表面张力,如图 2.8 所示。

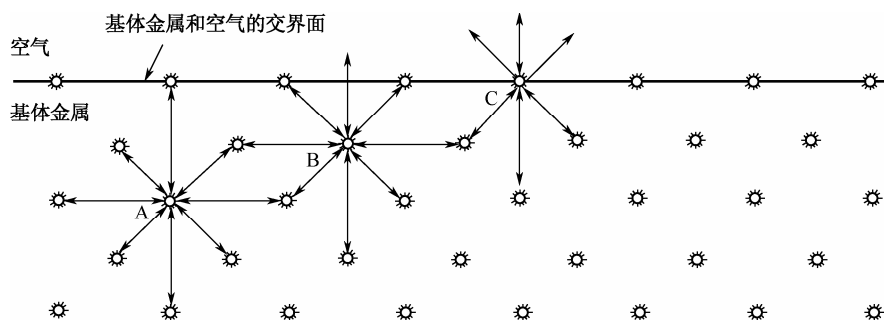


图 2.6 液态金属的表面状态

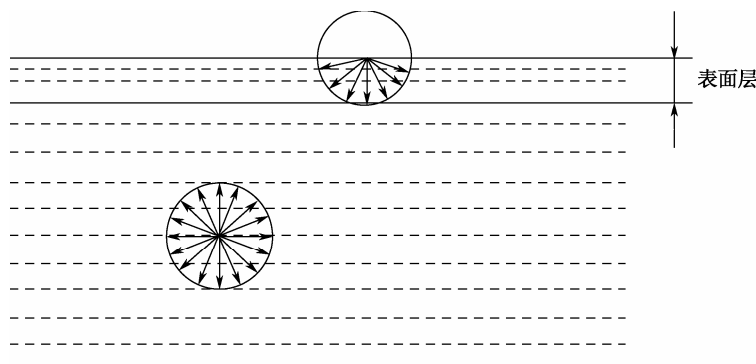


图 2.7 液态金属的表面层

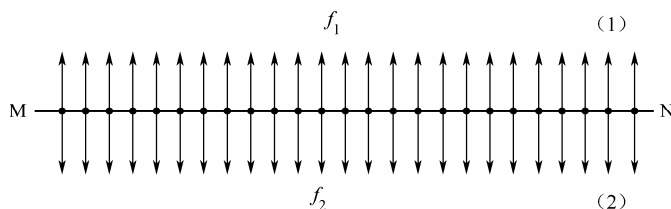


图 2.8 液态金属的表面张力

图 2.8 中的直线 MN 表示在液面上所设想的任意一条分界线，它把液面划分成 (1) 和 (2) 两部分， f_1 表示液面区 (1) 对液面区 (2) 的拉力， f_2 表示液面区 (2) 对液面区 (1) 的拉力。这两个力都与液面相切，并与 MN 垂直，大小相等、方向相反。这就是液面上相接触的两部分表面相互作用的表面张力。

表面张力 f 的大小是和液面上设想的分界线 MN 的长度 L 成正比的，因此可以写成

$$f = \alpha L \quad (2.1)$$

式中，比例系数 α 称为表面张力系数，单位为达因/厘米。在量值上， α 等于沿液面作用在分界线单位长度上的表面张力。

表面张力系数 α 也可定义为增加单位表面面积所需要的功，或增加单位表面面积时液面位能的增量。表面张力系数 α 的单位也可采用尔格/厘米，其与液面面积大小无关，只与增量有关。



2.2.3 润湿及分类

从化学热力学的角度看,润湿就是指由固-液相界面来取代固-气相界面,从而使体系的自由能降低的过程。在不同相存在的界面上,由于相界面分子与相内分子之间作用力的不同,相界面能量总是趋于最小。当钎料与基体金属接触时,钎料是否能将基体金属表面的气体排开,沿基体金属表面铺展,取决于钎料对基体金属表面的附着力与由钎料粒子间的接合力产生的内聚力的大小关系。

润湿主要包括附着润湿、浸渍润湿和铺展润湿。附着润湿如图 2.9 所示,是指固体与液体接触后,将液-气相界面和固-气相界面变为固-液相界面的过程。在此过程中,系统的表面自由能将发生变化。设固-气、液-气和固-液三相界面的比表面自由能分别为 σ_{sg} 、 σ_{lg} 、 σ_{sl} , 则上述自由能变化为

$$\Delta G_a = \sigma_{sl} - (\sigma_{sg} + \sigma_{lg}) \quad (2.2)$$

定义 W_a 为粘附功, 且 $W_a = -\Delta G_a = \sigma_{sg} + \sigma_{lg} - \sigma_{sl}$ 。粘附功越大, 则附着润湿越强。如果焊接时钎料是预先放置在接头间隙中的, 则在钎料熔化并润湿基体金属时, 情况与附着润湿相近。

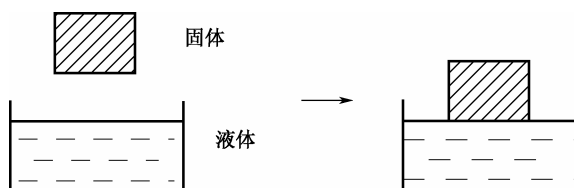


图 2.9 附着润湿示意图

浸渍润湿如图 2.10 所示, 是指固体浸入液体的过程, 在此过程中, 固-气相界面为固-液相界面所取代, 而液相表面没有变化。当浸渍面积为单位值时, 自由能变化为

$$\Delta G_i = \sigma_{sl} - \sigma_{sg} \quad (2.3)$$

定义 W_i 为浸渍功, 且 $W_i = -\Delta G_i = \sigma_{sg} - \sigma_{sl}$ 。浸渍功越大, 则浸渍润湿越强。如果焊接时熔融钎料自动填充接头间隙, 则钎料润湿基体金属时, 情况与浸渍润湿相近。

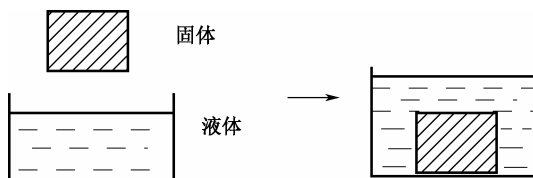


图 2.10 浸渍润湿示意图

铺展润湿如图 2.11 所示, 是液体在固体表面上铺开的过程, 即以液-固相界面和新的液-气相界面来取代固-气相界面和原来的液-气相界面的过程。当铺展面积为单位值时, 表面自由能变化为

$$\Delta G_s = \sigma_{sl} + \Delta\sigma_{lg} - \sigma_{sg} \quad (2.4)$$

假设液滴的体积很小且完全铺展, 则上式简化为



$$\Delta G_S = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} - \sigma_{sg} = -W_a + W_n \quad (2.5)$$

式中, $W_n = 2\sigma_{lg}$, 称为液体的内聚功。

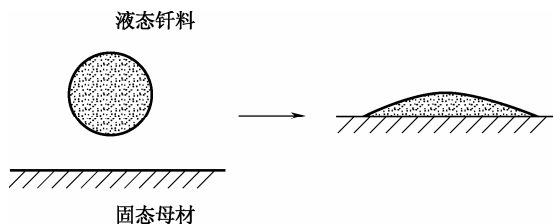


图 2.11 铺展润湿示意图

定义 W_S 为铺展功, 且 $W_S = -\Delta G_S = \sigma_{sg} - (\sigma_{sl} + \sigma_{lg})$ 。铺展功越大, 则润湿铺展越强。

对于同一物系, $W_a > W_l > W_s$, 若 $W_s > 0$, 则系统肯定能发生附着、浸渍润湿; 若 $W_s \leq 0$, 则系统有可能会发生附着、浸渍润湿, 但不一定会出现铺展润湿, 如特定工艺条件下的无铅钎料润湿行为。

在电子装联工艺中, 焊接时往往伴随着多种润湿情况。为了准确表达钎料润湿行为, 一般用 W_s 表示润湿功。当钎料对基体金属的粘附功大于钎料的内聚功, 也就是当 $\sigma_{sg} - \sigma_{lg} - \sigma_{sl} \geq 0$ 时, 钎料就会在基体金属上铺展润湿。因此, σ_{sg} 、 σ_{lg} 和 σ_{sl} 的大小决定了钎料在基体金属上的润湿和铺展行为。材料的润湿性评估方法, 即润湿平衡测试过程中, 钎料润湿测试铜片就兼有上述三类润湿, 因此可通过最大润湿力和润湿时间来对润湿性进行系统评估。

2.2.4 杨氏方程 (Young's Equation)

假设润湿过程发生在理想表面上, 系统达到平衡状态, 体系的温度、压力和组成均不发生变化, 则体系的总自由能变化仅取决于表面自由能的变化。固体平界面上的液滴发生铺展润湿后, 最终会达到平衡状态, 即体系三相边界点上的表面张力达到力的平衡, 如图 2.12 所示, 则有:

$$\sigma_{sf} - \sigma_{sl} = \sigma_{lf} \cdot \cos \theta \quad (2.6)$$

由此即得杨氏方程, 即润湿方程, 也称毛细作用第二定律:

$$\cos \theta = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lg} \quad (2.7)$$

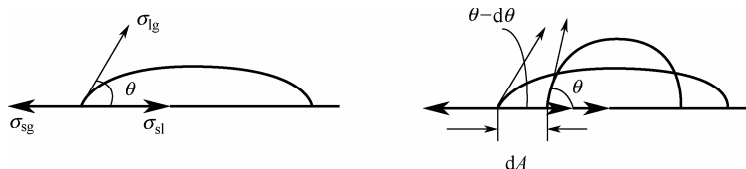
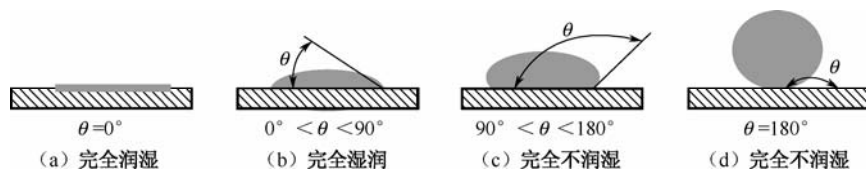


图 2.12 三相边界点上的表面张力平衡示意图

$\cos \theta$ 又称为润湿系数, 其和接触角 θ 均可用来衡量润湿程度的大小。当 $\theta = 0^\circ$ 时, 称为完全润湿; 当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 称为润湿; 当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, 称为不润湿; 当 $\theta = 180^\circ$ 时, 称为完全不润湿, 如图 2.13 所示。显然, 接触角 θ 越小, 液态钎料越容易铺展, 表示钎料对焊接金属的润湿性能越好。

图 2.13 接触角 θ 与润湿性的对应关系

理论上,接触角 θ 最好小于 20° (洁净表面的铜和 Sn-Pb 共晶钎料之间的接触角),但通常焊接要求钎料接触角 $M \leq 75^\circ$ (M 纯系根据经验和为满足特定的要求而人为规定的),而标准 J-STD-001 规定 $\theta \leq 90^\circ$ 时,通常情况均为可以接受。

对于质量控制来说,应把 M 明确规定为润湿良好和焊点良好的判据。但是必须考虑到钎料和周围基体金属表面间所形成的接触角,它实际上是可利用的钎料量和基体金属表面积大小的函数。为了证明这一点,下面分析两种极端情况:一是在无限大的基体金属表面施加有限的钎料,这种情况将给出真实的润湿情况;二是在有限的小基体金属表面上施加大量钎料,则钎料必然形成很厚的钎料层,这实际上使钎料在其与基体金属表面的接合处加厚,在这种情况下,接触角与润湿情况无关。润湿情况和焊点的可检查性密切相关,在有限表面上施加过量钎料掩盖了实际的可检查区域,常会得出错误的检查结论,这进一步说明必须防止钎料过多的焊点。

值得注意的是,杨氏方程的前提条件是体系的温度、压力和组成均不发生变化。但在实际焊接中,温度、压力等参数不一定是常数,一般在允许范围内是可以使用的,但会造成一些偏差。同时,实际焊接过程中的基体金属和熔融的钎料间会发生剧烈的相互作用,这使得发生的毛细现象更为复杂,因此上面推导出的方程式只是近似的描述。另外,焊接时间过短可能存在系统不能达到平衡状态,因此接触角只能表示达到的润湿类型,而不能表示焊接系统的绝对润湿情况。在理想条件和延长焊接时间的情况下,大概能够给出的接触角较实际焊接过程中得到的要小得多。因此,鉴于可操作性考虑,实际焊接动态过程达到平衡时,杨氏方程可用以判断润湿状态。

2.2.5 助焊剂作用下润湿过程中的热动力平衡

由杨氏方程 (2.7) 可知,要促进润湿需要使 σ_{sg} 增加,或使 σ_{lg} 和 σ_{sl} 下降。而在实际焊接过程中,最常采用的方法是将第二种液体(助焊剂或称助焊剂)覆盖在钎料与基体金属表面,从而使界面的情况发生变化(见图 2.14),此时有:

$$\sigma_{sf} - \sigma_{sl} = \sigma_{lf} \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

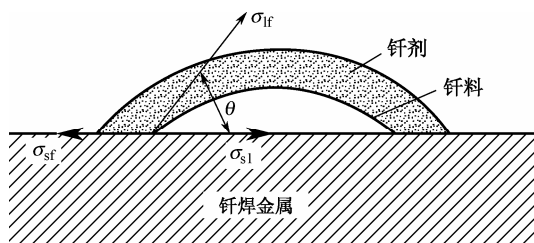


图 2.14 使用助焊剂时的界面张力情况



在上述三相系统中, 如果在使用助焊剂后可以使 $\sigma_{sf} > \sigma_{sl}$ 或 $\sigma_{lf} < \sigma_{lg}$, 就可以促进润湿。液态钎料的表面自由能和大多数金属一样约为 200 尔格/厘米, 而助焊剂类非金属的表面自由能往往低于 50 尔格/厘米, 因此助焊剂一般能润湿基体金属, 排开吸附于基体金属表面的任何蒸汽相, 使表面能更好地和钎料完全接触, 从而促进了润湿。

加入助焊剂降低界面张力, 从机理上讲主要是存在界面传质作用。图 2.15 给出了用 Bashfouth-Adams 静滴法测量汞滴—溶液间的界面张力的结果。在初始阶段, 界面传质速度过低, 由于表面电荷的影响, 界面张力微有上升, 随后就直线下降, 也即界面张力的下降与界面传质速度的升高成反比。以此类推, 助焊剂与固体金属的界面张力应有类似的关系, 也即在钎料—助焊剂和基材—助焊剂的界面上同时发生传质反应, 因而使润湿效果显著增加。值得注意的是, 传质速度是根据基材金属成分与助焊剂中析出(传质)物质之间的电极电位差而确定的, 并且传质速度应与传质物质与钎料或基体金属的合金化速度相匹配。

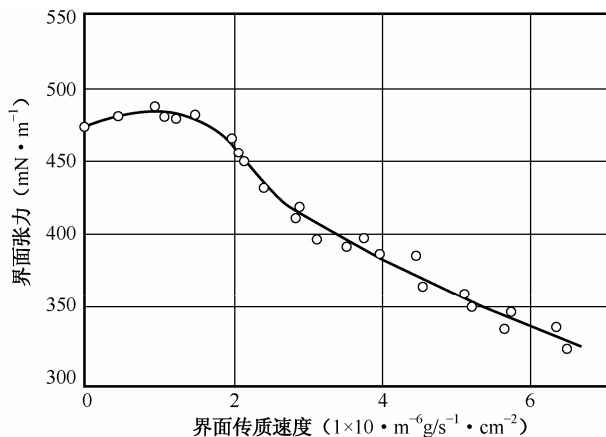


图 2.15 界面传质速度与界面张力变化的关系

2.2.6 润湿形式

当固体与液体接触时, 系统的吉布斯能降低即可达到润湿。润湿按润湿过程是否存在反应可分为两种形式: 反应润湿和非反应润湿(物理润湿)。

物理润湿过程的推动力主要来自范德华力和色散力等物理作用, 且物理润湿一般进行得很快, 在 10^{-3}s 内就可以达到平衡, 而且在这种体系中温度对润湿性能的影响比较小, 但是通常物理润湿的润湿性一般都比较差。

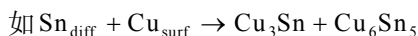
反应润湿过程的推动力可用反应驱动力来表示:

$$\frac{1}{2} \pi r \left(\frac{dE}{dr} \right) = \sigma + \Gamma(\theta) \quad (2.9)$$

式中, r 为铺展面积; E 为体系自由能; σ 为由于化合物形成的驱动力; $\Gamma(\theta)$ 为不平衡的界面张力的驱动力。

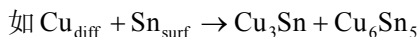
一般认为, 化合物的形成由以下两部分反应组成。

其一, 钎料的合金元素 Sn 等经界面向基体金属扩散形成反应:





其二，基体金属经界面向钎料扩散形成反应：



一般来说，若钎料和基体金属之间能相互溶解或形成金属间化合物，则液态钎料就能较好地润湿基体金属。Cu 和 Sn 在液态下可互溶，在固态下可形成金属间化合物，在 300℃ 时系统的界面张力值分别为 $\sigma_{\text{sl}}=1.54$ (N/m)、 $\sigma_{\text{lg}}=0.55$ (N/m)、 $\sigma_{\text{gs}}=1.67$ (N/m)，由杨氏方程可求出接触角 $\theta \approx 76^\circ$ ($< 90^\circ$)，因此可铺展。对于 Sn 基合金对铜焊盘的润湿体系而言，同时存在两种形式，即既存在物理润湿，又存在钎料合金与基体金属元素相互扩散形成金属间化合物的反应润湿，而且钎料的润湿性主要是由反应润湿的性能决定的。

2.2.7 润湿性影响因素

由杨氏方程可知，任何使 σ_{sl} 、 σ_{lg} 、 σ_{gs} 发生变化，从而使接触角 θ 发生变化的因素都将影响到钎料对基材的润湿性。从热力学观点来看，界面张力即比表面自由焓，它与各相的物性、成分、温度有关，因此接触角必然受这些因素的影响。从动力学观点来看，接触角必然受时间的影响。在实际焊接过程中，常常不可避免地发生基材向钎料中的溶解及钎料向基材之间的扩散，而溶解过程及扩散过程都与物性、成分、温度和时间有关。以下从热力学和动力学角度来讨论影响钎料对基体金属润湿性的因素。

1. 材料组成及特性对润湿性的影响

界面张力是材料本身的特性之一，它反映的是材料内部的原子对原子吸引力的强弱。因此，对不同的材料来说，其界面张力显然是不同的。改变三相物质任一相的组成，就相应地改变了界面张力，这必然要影响到钎料对基体金属的润湿性。一般而言，一定的物质在温度、压力和成分一定的情况下，其界面张力值是一定的。不同的物质，即使在相同的温度和压力条件下，其界面张力值也不同，这是因为不同物质的分子之间的作用力是不同的。因此，不难想象，对于成分确定的基材和钎料，当其表面氧化或采用助焊剂去除氧化膜时，都将影响到界面张力值，并进而影响钎料对基体金属的润湿性。而当钎料成分变化时，其润湿角也发生变化，其基本趋势是接近共晶成分时的接触角较小。

从热力学的角度来分析浓度对界面张力的影响，多元体系自由焓比相应非表面自由焓增加了一个自由度。通常，在多元体系中，随着某一成分的加入，体系界面张力的变化可分为 3 类，如图 2.16 所示，其中 III 类随浓度增大，表面张力急剧下降。III 类溶质有特别的实用意义，在化工、冶金和选矿等工业中，被称为“表面活性剂”或“变质剂”，在钎焊行业中通常称之为“表面活性物质”。这些都是由于浓度影响界面张力而在界面上发生吸附过程的缘故。

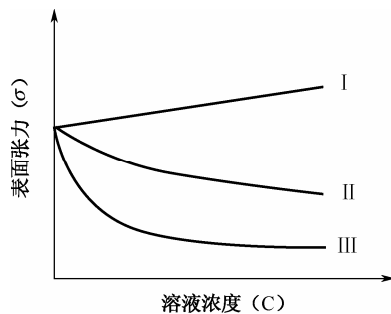


图 2.16 浓度对溶液表面张力影响的类型



2. 钎焊温度对润湿性的影响

温度对润湿性的影响主要体现在对表面张力和接触角的影响上。温度对表面自由焓的影响可由表面化学热力学普遍关系式得到。当温度变化范围不大时，有：

$$\sigma = a - bT \quad (a > 0, b > 0) \quad (2.10)$$

表面张力随温度的升高而呈现下降，直到达到液气临界点，表面张力会降低为零，其中温度系数 b 在 $(0.2 \sim 0.4 \text{ 尔格/厘米}) / ^\circ\text{C}$ 左右。如图 2.17 所示为锡的表面张力随温度变化的实测值。

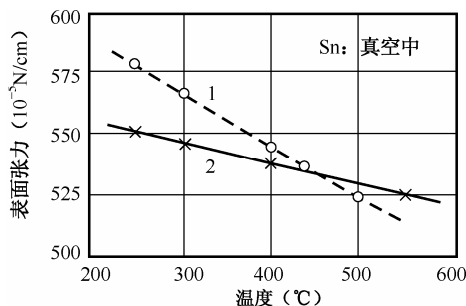


图 2.17 Sn 的表面张力与温度的关系

为了更好地描述表面张力与温度的关系，约特佛斯 (Eötvös) 对式 (2.10) 做了优化，有：

$$\sigma \cdot V_m^{2/3} = k(T_c - T) \quad (2.11)$$

式中， V_m 为液体摩尔体积； k 为普通常数（对非极性液体， $k=2.2 \times 10^{-7} \text{ J/K}$ ）； T_c 为临界温度（即表面张力趋于 0 时的温度）。

拉姆齐 (Romsay) 和希尔茨 (Shields) 等人对式 (2.11) 又进行了修正：

$$\sigma \cdot V_m^{2/3} = k(T_c - T - \tau) \quad (2.12)$$

在接近临界温度时可取 $\tau=6.0$ 。

至此，温度对表面张力的影响比较准确地用公式予以了表达。

温度对接触角的影响可通过将式 (2.10) 代入杨氏方程整理得到：

$$\cos \theta = \frac{b_s - b_{sl}}{b_l} - \frac{(a_s - a_l - a_{sl})/b_l}{T - a_l/b_l} \text{ 或 } \cos \theta = K_1 - \frac{K_3}{T - K_2} \quad (2.13)$$

当基体金属与钎料不溶时， K_1 、 K_2 、 K_3 均为常数；当基体金属与钎料互溶时， a 、 b 或 K_1 、 K_2 、 K_3 不再保持为常数，可以通过测得如图 2.18 所示的 $\cos \theta - T$ 的关系与标准双曲线渐近线的偏离程度来判断溶解扩散的过程。当温度超过某个值后，接触角接近某值而不再变化。

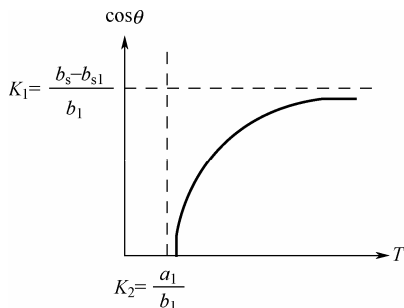


图 2.18 无溶解时 $\cos \theta$ 与 T 的双曲线关系



应用：可用以解释波峰焊接工艺评定中的润湿平衡测试结果，对于常用无铅钎料，当温度接近 270℃ 时，润湿力不再有明显增加。

3. 钎焊时间对润湿性的影响

从动力学的观点来看，接触角是随时间变化的，如图 2.19 所示。一般随着时间的增加， $\cos\theta$ 也不断增加。在初始阶段（50s 以前）， $\cos\theta$ 随 t 增长较快，称为一次过程。其后， $\cos\theta$ 增长较慢，并趋于常数，称为二次过程。

日本的安田、和田分别对一次润湿过程进行了研究。安田认为钎料的反应元素被基体金属吸附，并且服从兰格谬尔吸附动力学吸附量关系，他把吸附量换成了润湿面积进行考察。和田继承了安田的观点，进一步将吸附量换成固-液界面能的变化，转化成 $\cos\theta$ 的变化并导出：

$$\lg \frac{\cos\theta_e - \cos\theta}{\cos\theta_e} = -K''t \quad (2.14)$$

式中， K'' 为润湿速度常数； θ_e 为任意时刻的接触角。和田通过实验验证，其计算结果与实验结果吻合良好，尤其是在前 50s。

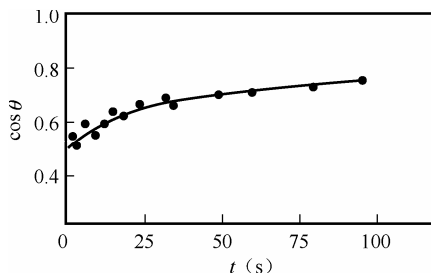


图 2.19 $\cos\theta$ 与时间 t 的关系

应用：可用以解释再流焊接工艺液相线以上的停留时间与焊点成型之间的关系。

4. 压力对润湿性的影响

根据热力学，由状态函数的性质可得，当压力变化不十分大时，可以忽略压力对表面张力的影响。

5. 基体金属表面状态对润湿性的影响

由于基体金属的实际表面并不是可以满足杨氏方程的理想表面，因此基体金属的表面状态必然影响钎料的润湿行为，主要体现在表面粗糙度和表面能均匀性上。

一般粗糙表面上的漫流能力超过光滑表面的漫流能力，此现象称为毛细管作用迟滞现象，这是因为粗糙表面的沟纹相当于毛细管，因而使其表面面积增加。基体金属的表面粗糙度对润湿性的影响满足威舍尔（Wenzel）方程：

$$\cos\theta_e = \frac{\gamma(\sigma_{sg} - \sigma_{sl})}{\sigma_{lg}} \quad (2.15)$$

将威舍尔方程与杨氏方程比较可得：



$$\gamma = \frac{\cos \theta_e}{\cos \theta} \quad (2.16)$$

式中, θ_e 为在粗糙度为 γ 表面上的接触角; γ 为粗糙因子 (≥ 1), 定义为真实平面的表面积与理想平面的表面积之比。图 2.20 说明了满足杨氏方程的接触角 θ 及满足威舍尔方程的接触角 θ_e 与粗糙因子 γ 的关系。

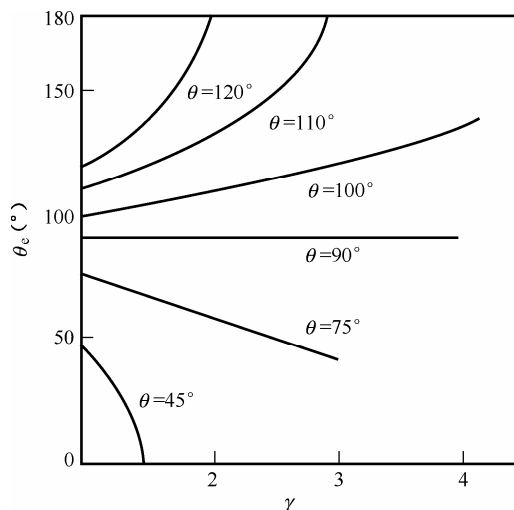


图 2.20 威舍尔接触角 θ_e 与粗糙因子 γ 的关系

应用: 可用以解释非润湿粗糙面不易沾锡而光洁面容易沾锡的现象, 如光滑阻焊膜表面锡珠现象、干净波峰焊链爪沾锡现象等。但对于润湿性基体金属, 钎焊时基体金属的显微不平处会迅速溶解进入钎料, 从而降低了表面粗糙度的影响, 使得各部分的铺展面积基本相同。

在润湿的过程中经常可以发现, 液体的前进端接触角较大, 而后退端接触角较小。这种前进端接触角 θ_a 与后退端接触角 θ_r 的差值称为接触角的滞后。对于接触角的滞后有“摩擦说”、“表面粗糙说”和“吸附说”等不同的理论解释。“表面粗糙说”认为, Wenzel 方程只适用于热力学稳定平衡状态, 但由于表面不均匀, 所以液体在表面上展开时要克服一系列由于起伏不平而造成的势垒。当液滴振动能小于这种势垒时, 液滴不能达到 Wenzel 方程所要求的平衡状态而处于一种亚稳定状态。图 2.21 描述了两不同的亚稳平衡状态的情形。一般来说, Wenzel 方程的平衡状态是很难达到的。如果将粗糙表面倾斜, 则在表面上的液滴会出现如图 2.22 所示的情况。这时液滴两边的 θ 虽然相等, 但前进角 (θ'_a) 和后退角 (θ'_r) 却不相等, 而且前进角总是大于后退角, 所谓的接触角滞后就是指这种现象。这种现象经常出现在 PCB 焊盘热风整平工艺中, 恶化镀层的平整性。

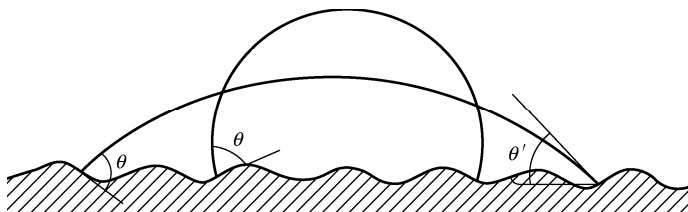


图 2.21 液滴在粗糙表面上的亚稳状态



关于基体金属表面能的影响,常指由于表面污染(特别是高能表面),使其在化学成分上往往是不均匀的;而且,由于原子或离子排列紧密程度的不同,不同晶面具有不同的表面自由能;即使同一晶面,也因表面的扭曲和缺陷造成表面自由能的差异;此外,实际工程材料多为多元多相合金材料,成分和相组成的差异必然造成表面各部分的自由能不同。以上原因都会导致一些高表面能区域和低表面能区域的出现,如图 2.23 所示。如果这种现象严重,就会出现局部润湿,表现为差的润湿性。

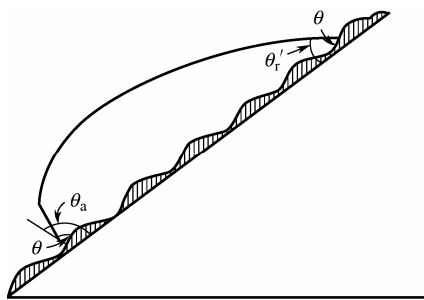
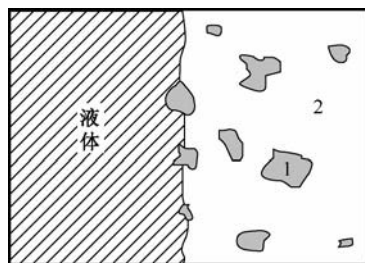


图 2.22 倾斜粗糙表面上液滴的接触角



1—低表面能区域; 2—高表面能区域

图 2.23 理想化不均匀表面示意图

2.2.8 润湿性评定方法

润湿性评定方法主要包括接触角法、Amott 方法(渗吸和排驱)和 USBM 方法。软钎焊中主要采用接触角法。钎料与基体金属间接触角的大小直接反映了润湿情况,而接触角的大小取决于铺展前沿三相交界点处界面张力的平衡。因此,要了解钎料对基体金属的润湿性,可通过测量接触角的方法来进行。但在实际应用中,由于直接测量接触角的困难和不精确性,所以在工程上还经常采用测量铺展面积、润湿时间和润湿力等方法。

1. 表面张力的理论推算

由表面张力的定义可知,如果能够测定形成表面时所作的功,再除以表面积就可求得表面张力,但实际上很难实现。尤其是测定固体的表面张力及界面张力,几乎找不到切实可行的方法。许多研究者对表面张力的理论计算问题进行了一些有益的研究工作,其计算结果可以作为实际工作的参考。目前主要的理论计算基于 Stefan 法则,相关数据可从有关手册中查找,也可根据特鲁顿规则(Trouton's rule)和盖斯定律(Hess law)作近似计算求取;涉及内容包括由晶体模型计算固、液体的表面张力,完全不溶体系界面张力的计算及合金溶液的表面张力和界面张力的计算等。

2. 表面张力及界面张力的测定

(1) 液态金属表面张力的测定

测量液体表面张力的方法有很多,如毛细管上升法、悬(液)滴法、圆环法、最大气泡法等。但对于液态金属来说,由于其比重和黏度较大,因此采用上述方法比较困难,目前比较实用的方法为固(座)滴法和吊板法。



(2) 固体表面张力的测定

直接测定固体金属的表面张力是十分困难的,这可能是因为固体表面显著不均匀,相邻两点间的表面张力不同,不能像液体那样自动均匀化,并且固体表面易被污染等。固体金属的表面张力一般可用细丝载重的方法来测定。

(3) 界面张力的测定

上述测定表面张力和界面张力的方法实现起来是很困难的,因此在通常的钎焊研究和生产中,一般多以上述方法作为定性判据,而对钎料的润湿和铺展性能则采用其他一些易于实现的方法和手段来测定。

图 2.24 为固相间的界面张力示意图,由三角几何关系可得

$$\frac{\sigma_{12}}{\sin \theta_0} = \frac{\sigma_2}{\sin \theta_1} = \frac{\sigma_1}{\sin \theta_2} \quad (2.17)$$

当已知两种不同晶粒的表面张力时,可以求取其界面张力。对于多晶体,如三晶交界处(见图 2.25)的界面张力关系为

$$\frac{\sigma_{12}}{\sin \theta_3} = \frac{\sigma_{23}}{\sin \theta_1} = \frac{\sigma_{31}}{\sin \theta_2} \quad (2.18)$$

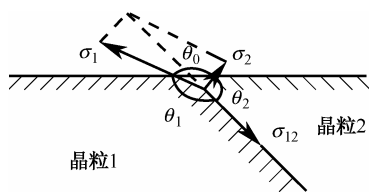


图 2.24 固相间的界面张力

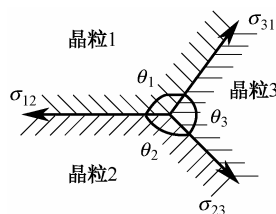


图 2.25 三晶交界处的界面张力

(4) 软钎焊工艺性能的测定

熔融钎料对基体金属的润湿性能是钎料的重要工艺性能指标,因此在工程上需要对其进行评定,尤其是希望能进行定量的评定。但目前还无法从理论上完全精确地确定实际工程体系的润湿性的优劣。原因之一是缺乏各种材料匹配之间的接触角数据。此外,实际焊接过程中的条件比较复杂,影响因素众多也是一个原因。因此,一般只能借助于试验方法来评定其润湿性。常用的测定方法包括润湿平衡测试法、接触角测量法(固滴法,也叫贝克曼法)、铺展面积测量法、铺展系数与润湿指数测量法、填缝长度测量法、复合板流动系数的测定(单板爬升法)、润湿时间的测定(焊球法)、一端浸渍法。其中,铺展面积测量法已被确定为国家标准(GB11364-89),铺展系数与润湿指数测量法已被日本工业标准(JIS)规定下来,一端浸渍法已被 JIS 和美国军用标准(MIL)作为标准规定下来。

2.2.9 常用去膜技术

在钎焊过程中,去除基体金属表面存在的氧化膜是保证液态钎料良好润湿基体金属并顺



利完成钎焊连接的基本前提。由于材料性质、成分上的差异，其表面的氧化膜也表现出不同的特性。为去除材料表面的氧化膜，可以采用物理的方法和化学的方法。目前去除氧化膜的方法主要包括助焊剂法、活性气体法、真空法、气体介质法和机械法，软钎焊中主要采用助焊剂法和机械法，而真空法只在特殊产品与行业中得以应用。

1. 助焊剂去膜

利用助焊剂去膜是目前使用的最广泛的一种方法，助焊剂在焊接过程中起着下列作用：清除基体金属和钎料表面的氧化物，为液态钎料在基体金属上铺展填缝创造必要的条件；以液体薄层覆盖基体金属和钎料表面，隔绝空气而起到保护作用；起界面活性作用，改善液态钎料对基体金属的润湿。

2. 真空环境去膜

真空是压力低于正常大气压的气体空间，通常按气压分为四个等级：粗真空、低真空、高真空和超高真空。它们分别对应的范围是： $1.01 \times 10^5 \sim 1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ ， $1.33 \times 10^3 \sim 1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ ， $1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ， $1.33 \times 10^{-6} \sim 1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ 。

对于真空条件下的氧化膜去除机理有多种观点。早期认为真空降低了氧分压，导致氧化物分解。但理论计算一般氧化物分解所需的真空度在工业上很难达到。目前还有以下几种观点：钎焊加热时金属氧化物挥发而去除；基体金属或组元发生挥发，破坏并排除了表面氧化物；氧化物为基体金属所溶解；表面氧化膜为基体金属合金元素还原去除；液态钎料的吸附作用使氧化膜强度下降，破碎弥散并溶入基体金属。上述过程不是相互排斥的，而是相互补充的。对于不同基体金属，可以具有不同的去膜过程；对于同一基体金属，温度不同，去膜过程也可能不同。在高温硬钎焊时，曾发现部分金属会挥发而去除氧化膜，但是对于软钎焊来说，以上作用很小，具体机理还有待研究。

3. 机械去膜（物理去膜）

物理去膜过程即超声波去膜，利用超声波振碎焊件表面的氧化物并去除。在电子工业中，实际操作时，对于氧化异常严重的金属表面，如 PCB 焊盘或元器件引脚，可采用机械刮擦方式去除氧化膜，然后搪锡保护。

2.3 钎料填缝过程

2.3.1 弯曲液面附加压力

润湿或不润湿，本质上是由液体分子与固体原子之间的相互吸引力（称为附着力）大于或小于液体分子之间的相互吸引力（称为内聚力）决定的。在液体和固体接触处，厚度等于分子作用半径的一薄层液体叫作附着层，如图 2.26 所示。附着层中的分子与液体内部的分



子不同，其作用球有一部分在固体之中，因此受力不对称。如果附着力小于内聚力，则分子所受的合力垂直于附着层而指向液体内部，如图 2.26 (a) 所示，有尽量挤入液体内部的趋势。因此，附着层有收缩倾向，这就是不润湿的根源。反之，如果附着力大于内聚力，则分子所受的合力垂直于附着层而指向固体，如图 2.26 (b) 所示，于是分子在附着层内的位能比在液体内部小。根据平衡时位能最小的原理，液体内部的分子将尽量挤入附着层，结果附着层有伸张倾向，这就是产生润湿的原因。总之，附着力大于内聚力，就发生液体能润湿固体的现象；而附着力小于内聚力，就发生液体不能润湿固体的现象。

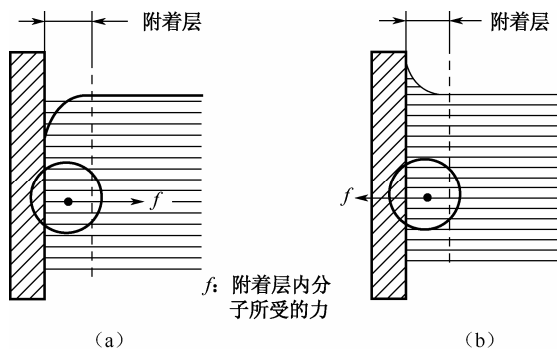


图 2.26 附着层

液体盛在容器内，器壁附近的液面往往形成弯曲的形状，如果液体能润湿固体，则液体就在接近器壁处向上弯曲，如图 2.27 (a) 所示。这是因为附着层中的伸张力 f_H 使该处的液体向上运动。而表面层的表面张力 f 与表面相切，有一个分力使该处的液体向下运动，两者同时作用的结果，形成如图 2.27 (a) 所示的曲面，达到平衡。反之，如果液体是不能润湿固体的，则液体就在接近器壁处向下弯曲，如图 2.27 (b) 所示。这是因为附着层中的收缩力 f_H 使该处的液体向下运动，而表面层的表面张力 f 沿器壁方向的分力使该处的液体向上运动，两者同时作用的结果，形成如图 2.27 (b) 所示的曲面，达到平衡。

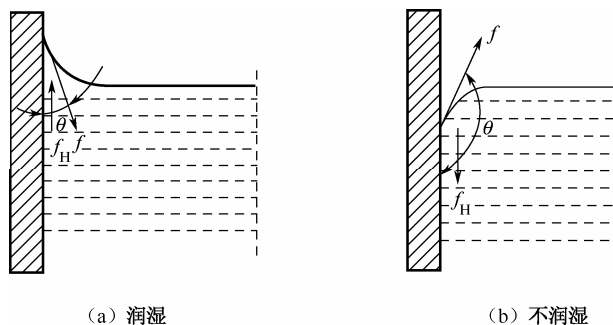


图 2.27 润湿和接触角

当液面为曲面时，会产生一种压力，称为附加压力，其定义为弯曲相界面时液体所受压力与平相界面时液体所受的压力差，即任意形状界面时比平界面时多出的压力。液体的表面薄膜与拉紧了弹性膜相似。如果液面是水平的，则表面张力也是水平的，如图 2.28 (a) 所示。如果一弯曲液膜的周界在一平面内，则这一薄膜本身也有取平面形状的趋势。凸膜变平的趋势对下层的液体施以压力，如图 2.28 (b) 所示；反之，凹膜变平的趋势对下层的液体起拉伸的作用，如图 2.28 (c) 所示。换句话说，与平液面下的液体所受的压强相比，弯



曲的液面对液体内部都施以附加压强；在凸面情形下，这个附加压强是正的，在凹面的情形下，这个附加压强是负的。

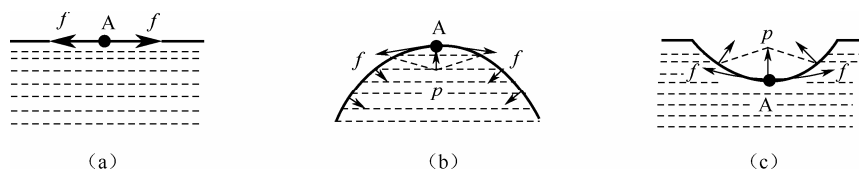


图 2.28 弯曲液面下的附加压强

附加压强的大小与曲面的曲率半径有关。作为一个特殊例子，可以证明，球形液面的附加压强是

$$P=2\sigma/r \quad (2.19)$$

式中， r 是曲面的曲率半径； σ 是表面张力。

曲率半径越小，附加压强越大，即弯曲液面的附加压强 P 与表面张力 σ 成正比，而与曲率半径 R 成反比。

2.3.2 拉普拉斯方程 (Young-Laplace)

对于一般情况，描述一个曲面需要两个曲率半径。对于球面，两个曲率半径相等；对于非球面，压强与曲率半径之间的关系满足拉普拉斯方程，即毛细作用第一定律：

$$P=\sigma(1/r_1+1/r_2) \quad (2.20)$$

式中， P 是液体表面的附加压强； σ 是液体表面张力； r_1 和 r_2 是液体表面的曲率半径。

由式 (2.20) 知，对于球面， $r_1=r_2$ ， $P=2\sigma/r$ ；对于平面， $r_1\rightarrow\infty$ ， $r_2\rightarrow\infty$ ， $P\rightarrow 0$ 。

拉普拉斯方程式是讨论液态钎料填缝的最基本方程。

2.3.3 弯曲液面对饱和蒸汽压的影响

由附加压力的分析可知，在其他条件相同的前提下，液面下流体所受的压力以凸液面时为最大，平液面居中，凹液面最小。开尔文公式描述了饱和蒸汽压与弯曲界面曲率半径及表面张力之间的关系：

$$\ln\left(\frac{P}{P^0}\right)_g = \frac{2\sigma M}{\rho RT r} \quad (2.21)$$

式中， P 为弯曲液面的蒸汽压； P^0 为平液面的蒸汽压； R 为常数； T 为绝对温度； r 为曲率半径。

开尔文公式可推广用于比较两个半径不同的液滴的蒸汽压，其表达式为

$$\ln\left(\frac{P}{P^0}\right)_g = \frac{2\sigma M}{\rho RT} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) r \quad (2.22)$$

开尔文公式主要应用于解释毛细管凝结、过饱和蒸汽凝结、过饱和液体成泡、过饱和溶液析晶及喷雾干燥等现象。在电子工业中，它主要应用于解释液态钎料结晶成核、新相生成等。



2.3.4 液态钎料毛细填缝过程

当把钎料放在钎缝间隙附近时,钎料熔化后有自动填充间隙的能力,即所谓的钎料填缝。这是由于液态钎料对基体金属润湿产生弯曲液面所致。如果将金属细管插入液态钎料中,管子的半径足够小,则在管壁处的液面就呈现连续的弯曲液面,因而产生附加压力,使钎料沿细管上升,这就是通常所说的毛细现象。毛细现象对于钎焊过程具有实际的意义。

1. 液态钎料水平间隙内的垂直爬升高度

当将两互相平行的金属板垂直插入液态钎料中时,假设平行金属板无限大,钎料量无限多,由于存在毛细作用,钎料润湿金属板会出现图 2.29 (a) 所示的情形,否则会出现图 2.29 (b) 所示的情形。

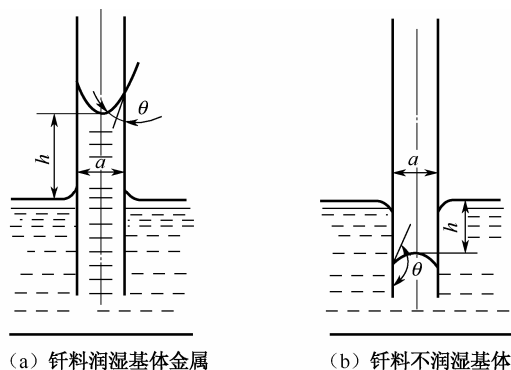


图 2.29 两平行板间液体的毛细作用

设两平行板所构成的间隙为 a , 插入液态钎料后钎料爬升高度为 h , 由拉普拉斯方程及几何关系和流体静力学可推导出:

$$h = 2(\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / \rho g a \quad (R_1 \rightarrow \infty, \text{ 而 } 1/R_1 \rightarrow 0) \quad (2.23)$$

应用: 用以解释元器件引脚直径与通孔孔径间隙对通孔填充高度的影响。

2. 液态钎料平行间隙内的垂直爬升动态过程

由于凹的弯液面对液体产生一个负的压力, 所以由图 2.29 可知, 当上升到任意高度时, 上升力应为负的附加压力与重力之差, 上升速度可由泊肃叶定律表示:

$$v = \frac{dy}{dt} = -\frac{a^2}{8\eta y} \left(\rho g y - \frac{2\sigma_l \cos \theta}{a} \right) = \frac{a\sigma_l \cos \theta}{4\eta y} - \frac{a^2 \rho g}{8\eta} \quad (2.24)$$

式中, η 为液体的黏度; y 为任意 t 时刻的爬升高度。

由式 (2.24) 可以看出, 上升速度与 $1/y$ 成线性关系。但实际上, 爬升液体的前沿不整齐, 弯曲液面的形状不规则, 因而造成内部空穴, 这是由于在式 (2.24) 的导出过程中假定了壁面处 $v=0$, 而且上升过程中 $-2\sigma \cos \theta / a$ 保持恒定。这与实验条件是不符合的。当 y 和 a 很小时, 式 (2.24) 中的第二项可以忽略, 于是简化成

$$v = dy/dt = a\sigma_l \cos \theta / 4\eta y \quad (2.25)$$



由式(2.25)可以看出,当毛细间隙 a 较小时,在爬升初期,上升速度与毛细间隙成正比。间隙越大,初期的上升速度越大。图2.30的实验结果证明了这一结论的正确性。在实际焊接过程中,钎料的爬升高度远远低于图中所示,主要原因是波峰焊接工艺中的时间较短,而再流焊接工艺中没有足够的焊锡量。

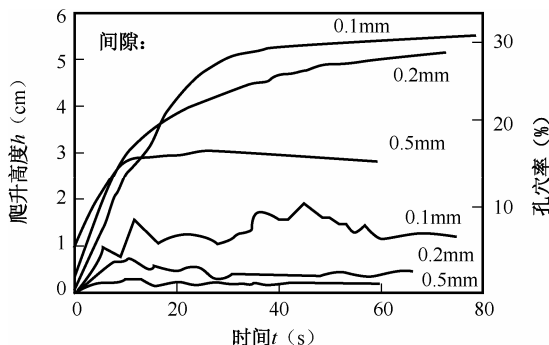


图 2.30 钎料爬升高度、孔穴率与毛细间隙的关系

3. 液态钎料平行间隙内的水平填缝动态过程

这种情况更接近于实际钎焊时的情况。由于间隙处于水平位置,液态钎料填缝时的附加压力与重力垂直,所以重力不起抵消附加压力的作用。因此,可将式(2.24)中的第二项取消,以填缝长度 L 代替 y ,由此得到

$$v = dL/dt = a\sigma_1 \cos \theta / 4\eta L \quad (2.26)$$

由式(2.26)可见,填缝速度与间隙 a 成正比。但当 $v=dL/dt=0$ 时, $L \rightarrow \infty$,无确定值。这时由于在水平间隙内填缝时附加压力与重力垂直,造成无平衡态存在,也就是说,当钎料量无限多时,填缝过程可以一直进行下去。Latin 对这一问题进行了实验测定,结果表明 L/t 与 a 基本上成线性关系。但是当间隙值越大时,实验结果与直线的偏差越大。这可能是由于小间隙时测定困难,使得误差变大。

为评价水平填缝时的润湿程度,定义“浸透系数” I_m 为

$$I_m = \sigma_1 \cos \theta / \eta \quad (2.27)$$

由此可见,浸透系数是一个动力学的评价指标,它与速度具有相同的因次。浸透系数越大,填缝速度越大,填缝能力越强,并且浸透系数与毛细尺寸无关,这比采用毛细爬升高度 h 更具优越性。

应用:可推广用于解释底部填充胶的底部填充行为。

4. 焊缝不致密性缺陷的形成机理

所谓焊缝的不致密性缺陷是指焊接间隙中的夹气、夹渣和未钎透等缺陷,会给焊点的密封性、导电性和抗腐蚀性等带来不利的影响。此类缺陷的产生与钎焊过程中熔化钎料及助焊剂的填缝过程有很大的关系。在通常平行间隙的情况下,液态钎料和助焊剂并不是均匀一致、整齐划一地流入间隙的,而是以不同的速度和不规则的路线流入间隙,这是产生不致密性缺陷的根本原因。



当钎料（或助焊剂）熔化后从平行间隙的一侧向间隙中填充时，在流动前沿和间隙的侧面边缘处都将出现弯曲液面，因而造成钎缝边缘处的附加压力比内部大，这使得钎料（或助焊剂）沿钎缝外围的流动速度比内部的填缝速度大，因而可能造成钎料对间隙内部的气体或助焊剂的大包围现象（见图 2.31）。一旦形成大包围后，所夹住的气体或助焊剂残渣就很难从很窄的平行间隙中排除，使得钎缝中形成大块的夹气和夹渣缺陷。除了大包围会产生致密性缺陷外，更常见的是由小包围产生的致密性缺陷。由于间隙内部金属的表面不可能绝对平齐，清洁度也有差异，加上液态助焊剂和钎料与基体金属的物理化学作用等因素的影响，常常造成钎料在间隙内紊乱地流动，流动前沿形似乱云，结果便造成小包围现象（见图 2.32）。

应用：可推广用于解释元器件底部填充气孔的形成原因。

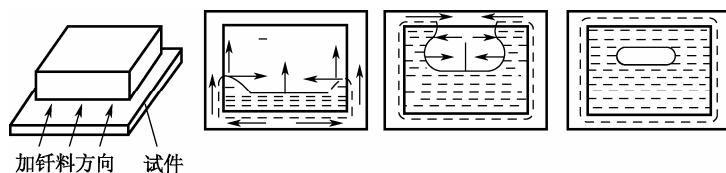


图 2.31 钎缝中的大包围缺陷形成示意图

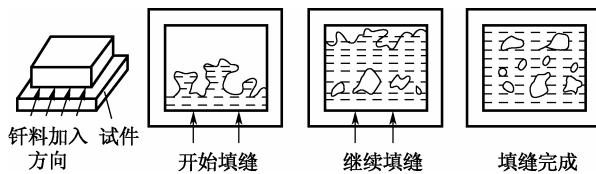


图 2.32 实际填缝过程及小包围缺陷的形成

5. 液态钎料不平行间隙内的垂直爬升高度

如果处于竖直位置的两平板构成不平行间隙并插入液态钎料中，两平板与 y 轴的夹角均为 α ，在钎料槽液面处 ($y=0$) 的间隙为 a （见图 2.33），对于上小下大的间隙下图中（a）有：

$$h(a - 2h \cdot \tan \alpha) = 2\sigma_{lg} \cos \theta / \rho g \quad (2.28)$$

同理，对于上大下小的间隙下图中（b）有：

$$h(a + 2h \cdot \tan \alpha) = 2\sigma_{lg} \cos \theta / \rho g \quad (2.29)$$

由式（2.29）可以看出，对于上大下小的间隙，钎料爬升的高度将减小；相反，对于上小下大的间隙，钎料爬升的高度将增大。

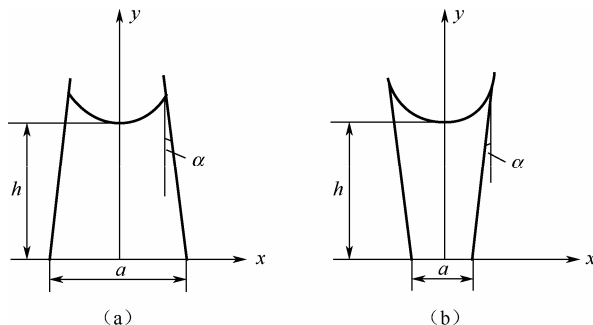


图 2.33 不平行间隙中液态钎料的爬升高度

应用：可用以解释通孔插装元件引脚插装后歪斜对通孔填充高度的影响。



6. 液态钎料不平行间隙内的填缝动态过程

当钎料填充一端大、一端小的不平行间隙时,由于毛细作用力是与间隙的大小成反比的,间隙越小,毛细作用越强,因此液态钎料(或助焊剂)就具有优先填充小间隙的趋势。有关液态钎料填缝过程的 X 射线摄影的研究结果表明,当液态钎料在不平行间隙中填缝时,不论是在大端、小端或侧端间隙处加入钎料,液态钎料总是优先填满小端间隙,然后逐渐向大端间隙方向推进(见图 2.34)。图 2.35 给出了钎料填缝运动趋势。

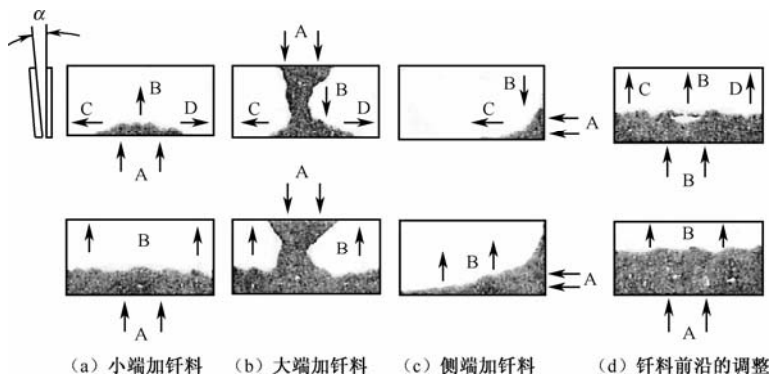


图 2.34 钎料在不平行间隙内填缝的过程示意图

此外,不平行间隙还为夹气和夹渣等缺陷的自动排除提供了可能性。如果在不平行间隙内由于大小包围现象而形成了夹气,当气泡的尺寸大于间隙值时,由于受到上下基体金属的限制,间隙内的气泡会形成像鸡蛋一样一端大、一端小的形状,在受到附加压不平衡的情况下,气泡会从小间隙端排除,如图 2.36 所示。实验结果表明,随着钎焊时间的延长,不等间隙钎缝内部的缺陷比例有降低的趋势(见图 2.37)。

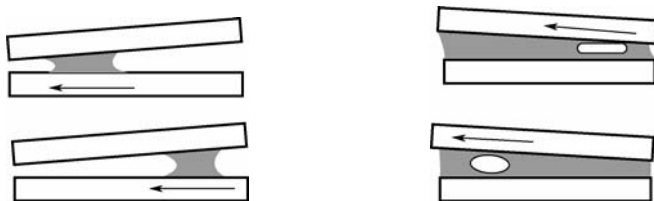


图 2.35 钎料自行趋向小端示意图

图 2.36 夹气从大端自动排除示意图

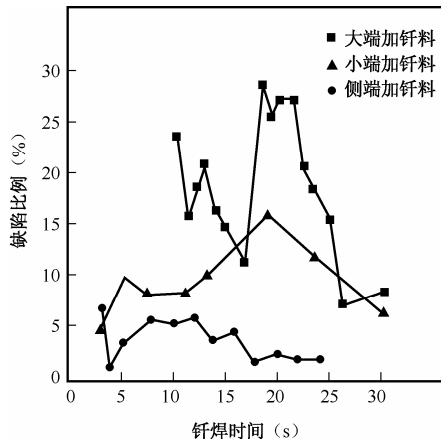


图 2.37 缺陷比例随钎焊时间的变化



应用：用以描述水平钎缝内的气孔排除路径，同时可用于解释翼型引脚、J形引脚等气孔率相对偏少的原因。

2.3.5 液态钎料的平衡形态

1. 单板垂直插入液态钎料时的润湿高度

当一金属板垂直插入液态钎料中时，如果液体润湿固体，则由于弯曲液面的附加压力作用，液体将沿垂直板固—液界面上升到一定的高度，形成一个稳定的圆角，如图 2.38 所示。

日本野邑雄吉对其最大润湿高度进行推导得出：

$$h_0 = 2\sigma_1(1 - \sin \theta) / \rho g \quad (2.30)$$

由式 (2.30) 可知，润湿越好，钎料上升高度越大。因此可以用 h_0 的大小相对判断润湿的程度。在实际钎焊过程中，焊点总有这种圆角存在，因此可通过观察和测量其大小来判断润湿程度。

应用：润湿平衡测试法采用的基本原理基于以上所述。液态钎料润湿元器件引脚焊端形成焊点，以及焊点成型建模也均基于以上所述。

2. 液态钎料在水平间隙中的平衡形态

当液态钎料在焊缝间隙内达到平衡时，系统能量必然最低。因此，对钎焊时的任何体系均可综合考虑重力势能和表面势能的变化情况，按照能量最低原则对问题进行求解。图 2.39 以液态钎料在水平间隙中的平衡形态为例进行了说明。

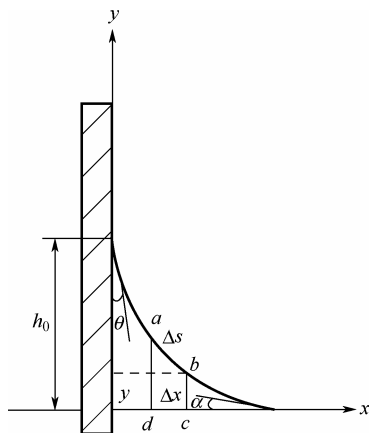


图 2.38 润湿垂直板的弯液面形状

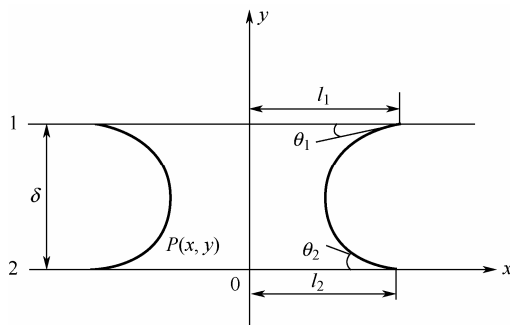


图 2.39 液态钎料在水平间隙中的平衡形态

当液态钎料能润湿基体金属时，对其在间隙中的形态可由 Laplace 公式和流体静力学关系推导出：

$$\frac{\rho g y}{\sigma} = \frac{P_0 - P_a}{\sigma} = \frac{1}{R} = \frac{y''(x)}{\{1 + [y'(x)]^2\}^{3/2}} \quad (2.31)$$

此公式为二阶微分方程，当有两个特解时即可对其求解。由于此微分方程的复杂性，要求其解析解是困难的，对此可采用有限元方法来求解。



应用：目前关于此平衡形态的研究较少，工艺应用也较少，再流焊接中的片式元器件侧钎料球缺陷是一种水平间隙平衡态演变的现象，工程中常采取减少钎料量的方式进行预防，但其机理尚待进一步研究。

2.4 溶解与扩散

液态钎料在毛细填缝的同时就与基体金属发生相互作用。这种相互作用的推动力是由钎料与基体金属间的浓度梯度（严格地说，应是化学位梯度）所造成的扩散。这种作用可分为两类：一是基体金属向液态钎料中的溶解；二是钎料组分向固态基体金属中的扩散。这些相互作用的结果会对钎焊接头的性能产生很大的影响，因此有必要研究其规律性。

在钎焊过程中，一般都会发生基体金属向液态钎料中溶解的过程。钎缝结晶区的化学成分往往与原钎料的成分不同，如果将钎料向基体金属中的溶解控制在适当的程度，则可使钎料成分合金化，有利于提高接头强度。但如果控制不当而造成基体金属的过度溶解，就会使液态钎料的熔点升高、黏度增加和流动性变差，往往导致不能填满钎缝间隙。同时也可能使基体金属的表面出现熔蚀缺陷，即在放置钎料处或钎缝圆角处使基体金属因过分溶解而产生凹坑，严重时甚至会出现溶穿现象。

2.4.1 物质间的互溶条件与界面张力关系

两种纯物质间能否互溶，取决于混合前后的自由焓变化。由热力学可知，在等温和等压条件下，两种物质混合后熵增大于溶解互溶，而最终是否出现互溶取决于焓变。焓变与物性有关，固不同金属之间将会出现完全互溶、部分互溶和完全不溶。

如果将物质间的互溶条件与界面张力结合起来进行讨论，将界面张力与互溶统一起来，使界面张力的概念扩大应用到相互化合、完全互溶、部分互溶的多元系各类情况，则在实践上具有重要的意义。例如，在研究钎焊润湿过程时，不再将其看成单纯的表面润湿，而是将“溶解”也看成广义的润湿，这样就把润湿过程看作更为一般的物质之间的相互作用。实际的钎焊过程也确实常常伴随着溶解过程，这样一来，就可以得到如下定性推论：液体在固体表面上的润湿，随着它们之间的作用情况的变化，从化合、完全互溶、部分互溶到完全不溶依次减弱。

2.4.2 基体金属的溶解过程

固态基体金属在液态钎料中的溶解过程是一个多相反应过程，它经历两个阶段，即基体金属与液态钎料界面层的扩散和扩散边界层向液态钎料的远处扩散，示意图如图2.40所示。

第一阶段是与钎料接触的基体金属表面层的溶解，这个反应发生在固-液两相界面上，其实质是液体金属对固体金属的润湿和原子在相界面处的交换，破坏固体金属晶格内的原子

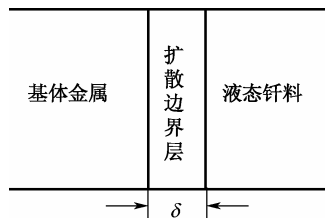


图 2.40 扩散边界层示意图



结合,使得液体金属原子与固体金属表面处的原子间形成新的键,从而完成溶解过程的第一阶段。此阶段也可被理解为液态钎料与固态基体金属接触时,液体组分首先向固体表面扩散,在厚度约为 10^{-7}mm 的表面层内(液相稳定形核尺寸)达到饱和溶解度,此时固体表面层不需消耗能量即可向液体中溶解。值得注意的是,扩散过程要经过一段时间间隔后方才开始,这个时间间隔等于相与相之间能峰的松弛时间(即所谓的滞后周期)。其后,在无化学成分改变的条件下,不同金属间原则上也是可以结合在一起的。但计算表明,液态金属与固体金属相互作用时,扩散过程所需要的时间与金属接触的时间相比是很短的,因此在实际钎焊条件下,扩散过程总是能够进行的。

第二阶段是被溶解的金属原子透过相界面(扩散边界层)进入液相远处的过程。根据对流扩散理论,对流迁移促使液体成分很快均匀化,除了紧靠界面的很薄一层外。由于在扩散边界层内溶解原子的浓度梯度很大,所以大群原子的扩散迁移是主要的,在扩散边界层外部流动着的液体则使溶解的物质在整个体积内均匀分布。至于这种均匀分布的程度则与钎焊时的具体情况和工艺因素有关。

1. 溶解速度(Nernst 一次速度式)

基体金属在实际钎焊过程中的溶解行为是相当复杂的。分析时对其进行一定的稳定态假设,在恒温条件下,溶解速度可表示为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d(\rho CV)}{dt} = K(C_0^L - C)S \quad (2.32)$$

式(3.32)的物理意义为溶解速度正比于固液相界面面积 S , 正比于饱和浓度与液体实际浓度之差 $(C_0^L - C)$ 。当温度变化时, C_0^L 和 K 都将发生相应的变化,因此式(2.32)也可写成

$$\frac{dQ}{dt} = K(T)[C_0^L(T) - C]S \quad (2.33)$$

如果在溶解过程中,液相体积 V 和固液相面积 S 可认为不变,并假设初始浓度 $C_0=0$, 则有 Nernst 一次速度式:

$$C = C_0^L(T)[1 - \exp(-\frac{K(T)S}{\rho V}t)] \quad (2.34)$$

式中, K 为溶解速度常数,可表达为

$$K = \frac{K_s \cdot D/\delta}{K_s + D/\delta} \quad (2.35)$$

式中, D 为扩散系数; δ 为扩散层厚度; K_s 为界面反应速度常数,可表示为

$$K_s = k \cdot \frac{C_s}{C_0^L} \quad (2.36)$$

式中, k 为固体金属原子进入液体的概率,即振动因子; C_s 为单位固体表面内的固体原子数。

上述溶解过程中存在的界面反应过程与扩散过程为串联过程。由动力学可知,对于串联过程来说,当各个阶段的速度相差悬殊时,整个过程进行的速度即取决于最慢阶段的速度,这个阶段就被称为控制步骤。因此,在特殊情况下,上述溶解过程可分为两种情况:一是界



面反应过程为控制步骤；二是扩散过程为控制步骤。

当界面反应过程为控制步骤时，即 $D/\delta \gg K_s$ 时，式 (2.36) 简化为

$$K = \frac{K_s \cdot D/\delta}{K_s + D/\delta} \approx \frac{K_s \cdot D/\delta}{D/\delta} = K_s \quad (2.37)$$

即整个溶解过程的速度常数等于界面反应速度常数，此时整个过程表现为界面反应（狭义的溶解）规律。

当扩散过程为控制步骤时，即 $D/\delta \ll K_s$ 时，式 (2.37) 简化为

$$K = \frac{K_s \cdot D/\delta}{K_s + D/\delta} \approx \frac{K_s \cdot D/\delta}{K_s} = \frac{D}{\delta} \quad (2.38)$$

即整个溶解过程的速度常数等于扩散速度常数，此时溶解过程的规律表现为扩散规律。

应用：可用于解释 Cu 与 Sn 体系中 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 等金属间化合物的生长机理。

2. 溶解速度常数影响因素

溶解速度常数 K 表示在相同浓度差值和相同固-液相界面面积的条件下，基体金属溶解速度的快慢。对于每种基体金属与液态钎料的组合来说， K 值都是不同的。 K 值可以通过实验方法来测定。经实验测得不同瞬时在熔融金属

中溶解金属的浓度，就可求出溶解速度常数 K 。例如，Cu 向熔融 Sn 中溶解时，在 η 相 (Cu_6Sn_5) 生成的范围内扩散为控制步骤，而在 ε 相 (Cu_3Sn) 生成的范围内界面反应为控制步骤。在这些温度范围内的 K 值约为 $5 \sim 60 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ 。另外，Cu 在 Sn 中溶解时，在某一温度区间内的溶解速度变慢，是因为界面上开始形成金属间化合物而阻碍了基体金属原子向液态钎料中的扩散，使得溶解速度降低（见图 2.41）。

溶解速度常数 K 作为描述溶解动力学特性的基本参数，其数值是由固体金属在液体中溶解时的基本物理过程所决定的。Sn-Cu 固-液相在 300°C 时的溶解速度常数 K 为 $95 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ 。一般情况下，不同固-液系统中金属的溶解速度常数都具有几乎相同的数量级。表 2.1 给出了不同温度下，一些金属在 SnPb 钎料中的溶解速度。由表中数据可见，Au 与 Ag 在钎焊温度范围内的溶解速度非常高，而 Ni 的溶解速度极低。

应用：为基体金属与可焊保护层之间的阻挡层金属及厚度提供了理论依据。

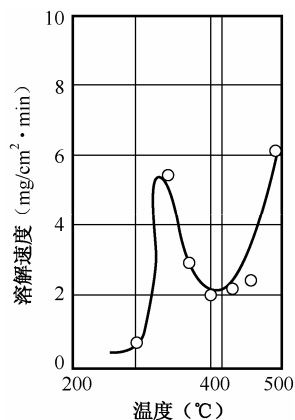


图 2.41 Cu 在 Sn 中的溶解速度与温度的关系



表 2.1 不同温度下金属在 SnPb 钎料中的溶解速度

金属	温度 (°C)	溶解速度 ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	金属	温度 (°C)	溶解速度 ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Au	199	0.89	Ag	199	0.53
	216	1.74		232	1.11
	232	2.99		274	2.46
	252	4.25		316	4.84
Pt	371	0.021	Ni	371	0.043
	427	0.13		426	0.11
	482	0.43		482	0.29
Pd	232	0.036	Cu	232	0.10
	274	0.091		274	0.18
	316	0.16		316	0.54
	371	0.36		371	1.56
	427	1.03		427	3.63
	482	2.02		482	6.30

总之,溶解过程包括溶质原子从固相表面向液相迁移的界面反应过程和溶质在界面处生成饱和层向液体内部移动的扩散过程。一般来说,在静态条件下,固体金属向液体金属中溶解的过程取决于溶解的第二阶段,即扩散阶段。但是当固液两相金属在溶解过程中生成金属间化合物时,溶解过程的动力学问题则由相界面间的反应速度起决定性作用。

往钎料中添加基体金属可抑制向钎料中的过分溶解。由于溶解速度和溶解量与温度和时间有关,因此可以根据钎焊温度和时间来选择 Ag 和 Cu 的初始加入量。一般溶解速度常数的对数与温度的倒数基本上成线性关系,即服从阿累尼乌斯公式:

$$\lg K = A' + B'/T \quad (2.39)$$

由阿累尼乌斯公式知:

$$K = A \cdot \exp(-E/RT) \quad (2.40)$$

式中, K 为溶解速度常数; E 为溶解活化能; A 为指前因子。 A 和 E 仅与物性有关,而与温度无关。对比式 (2.39) 和式 (2.40) 两式可知

$$A' = \lg A, \quad B' = -E/2.303R \quad (2.41)$$

由阿累尼乌斯公式知,温度升高, K 增大,溶解速度增大。这说明溶解速度之所以随温度升高而增大是由于活化分子分数 $[\exp(-E/RT)]$ 增加的缘故。

另外,对于难以钎焊的材料,常采用表面镀层的方法来改善其钎焊性能。在这种情况下,镀层的厚度也要根据溶解速度来决定。一般来说,对凝固后钎缝组织的金相观察表明,其饱和溶解层的厚度在 $2 \sim 4\mu\text{m}$ 左右,因此镀层厚度一般不应少于 $2 \sim 4\mu\text{m}$ 。

应用: 可用于解释表面镀层的作用及其工艺厚度要求。

3. 润湿系数与溶解速度常数的关系

假定润湿系数与溶解量成正比,则有润湿系数随时间变化的关系式:

$$\cos \theta = \cos \theta_c \exp\left(1 - \frac{K \cdot S}{\rho \cdot V} t\right) \quad (2.42)$$



将润湿系数中常数 ($KS/\rho V$) 的倒数定义为“润湿时间常数” τ , 其物理意义为: 润湿角 θ 达到 $(\cos\theta_c - \cos\theta) / \cos\theta_c = 1/e$ 所需要的时间, 即

$$\tau = \frac{\rho \cdot V}{K \cdot S} \quad (2.43)$$

由润湿时间常数的表达式可见, 液态钎料的体积 V 越小, 或者 K 越大 (温度越高), 则一次润湿过程越易于在短时间内完成。

4. 溶解现象与状态图的关系

在基体金属-钎料所构成的体系中, 最大溶解量是与其所构成的状态图密切相关的。如果两者所构成的状态图在固-液状态下均无互溶, 就不会发生溶解, 反之则有溶解现象发生。

若基体金属 A 与钎料 B 构成如图 2.42 所示的简单共晶状态图, 即两者在固态下无互溶, 在液态下完全互溶, 则当钎焊温度为 $T^\circ\text{C}$ 时, A 在 B 中的最大溶解量取决于 A 在 B 中的极限溶解度 (线段 l)。如果金属 A 和金属 B 在液态下完全互溶, 并且在固态下局部互溶, 其状态图如图 2.43 所示, 则最大溶解量就受到 A 在 B 中的极限溶解度和 B 在 A 中的极限固溶度的限制。在 $T^\circ\text{C}$ 下, 当用 A 作为基体金属, B 作为钎料时, 在基体金属 A 溶解之前, 先需要钎料 B 向基体金属 A 中扩散, 使界面处的基体金属成分到达 a 点时, 才发生溶解。并且基体金属 A 进入钎料 B 时钎料的成分到达 b 点时便停止溶解。因此, 如果钎料 B 在基体金属 A 中的极限固溶度越大 (即 a 点远离 AD 线段), 则基体金属开始发生溶解所需要的时间就越长, 在给定时间内的溶解量就越少。而基体金属 A 在钎料 B 中的极限溶解度越大 (即 b 点远离 AD 线段), 则钎料成分达到饱和所需要的时间就越短, 需要消耗基体金属的量就越多, 溶解量就越大。一般来说, 如果 A 在 B 中的极限溶解度 C_{AB} 和 B 在 A 中的极限固溶度 C_{BA} 之差越大, 其溶解量就越大 (即 ab 间隔大时溶解量大), 反之则小。

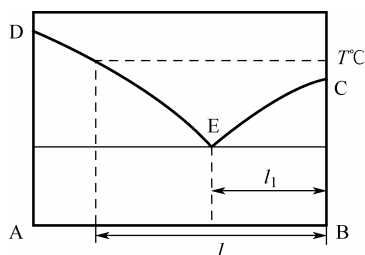


图 2.42 简单共晶状态图

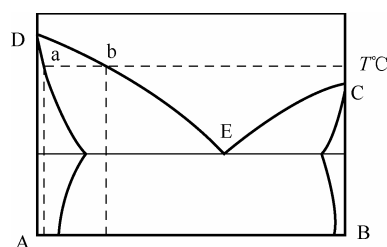


图 2.43 固态下局部互溶的共晶状态图

5. 接触溶解

如果 A 和 B 构成简单共晶状态图, 并且加热温度 T 取为 $T_E < T < T_{Bm}$ ($< T_{Am}$), 由于 T 没有超过 A 和 B 的熔点, 所以最初两种金属均为固态, 不发生熔化。但是由于接触界面上可以发生 A、B 原子间的相互扩散, 当金属 A 中的 B 原子浓度 C^a 和 (或) 金属 B 中 A 的原子浓度 C^b 分别达到 T 温度下所对应的极限固溶度 C^a 和 C^b 时 (见图 2.44), 则先出现饱和固溶体后才在它们的界面处出现液相, 并随之发生溶解现象。此时液态金属在紧靠近金属 A 的界面处的成分为 C^{L-a} , 在紧靠近金属 B 的界面处的成分为 C^{L-b} 。随着保温时间的延长, 液



态金属的量逐渐增多，并在液相中形成明显的浓度梯度。只要扩散过程有条件继续进行，液相层的厚度就会不断增加，直到低熔点的固相金属 B（假设其总量比 A 少）全部溶解而结束。此时，在高熔点金属 A 的界面上，保持与液态成分相同的平衡浓度 $C^{L-\alpha}$ 。这种情况下的溶解被称为接触溶解，习惯上又称为接触反应。

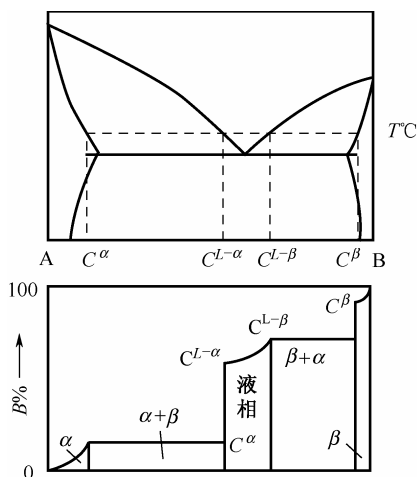


图 2.44 接触反应钎焊时的浓度变化

接触反应过程不仅在 A 和 B 构成简单共晶状态图时可以进行，而且在构成低熔固溶体状态图时也可进行。只是形成低熔固溶体的速度较慢，因此在实际生产中较少采用。利用接触反应原理进行的钎焊连接被称为接触反应钎焊。其钎焊过程大体上可以分为以下 3 个阶段。

① 准备阶段，如在接触的固态金属的界面上形成固溶体层或金属间化合物层。如果接触的固体金属在固态下无相互作用，则此阶段将不发生。

② 形成液相。

③ 固态金属向已形成的液相中溶解。固态金属接触表面形成液相的速度是极快的。例如，铋和锡在比它们的共晶熔化温度高 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的条件下接触反应熔化时，只要 0.5s 就足以形成液体。所形成的液相活性很大，在接触表面上迅速铺展，之后，随着溶解过程的不断进行，固相与液相间逐渐达到平衡。

接触反应时，为使基体金属与钎料形成紧密的接触以利于接触反应熔化的进行，对被连接金属施加一定的压力是十分重要的。压得紧，基体金属之间的接触点就多，液相形成的速度就快，接触面上形成的液相就越完全。施加压力还可以使形成的液相从间隙中挤出，以免基体金属过分溶解，同时还可以将破碎的氧化物挤出间隙，提高接头质量。如果形成的低熔共晶比较脆，则挤出液相有利于提高接头强度。

6. 基体金属溶解过程对钎缝化学成分的影响

溶解形成的溶液浓度取决于固态金属与钎料构成的状态图所决定的在该温度下的饱和浓度。当液态钎料填充毛细间隙之后，基体金属的溶解是在液体中没有强迫对流的情况下进行的。通常钎缝的间隙不会超过 1mm ，而扩散边界层的厚度也在 10^{-1}mm 数量级，并且基体金属是在两个相对着的表面向钎缝中的液态钎料内溶解的。也就是说，在静态液相中界面处



的两个边界扩散层的厚度可能大于实际钎焊时毛细间隙内液态钎料的厚度,因此,钎缝中基体金属的大群质量迁移基本上不能发生。

在溶解过程受控于扩散阶段的情况下,溶解速度常数可由式 $K=D/\delta$ 决定。由于钎缝中液态金属的量很少且双面溶解, δ 值不太可能大于钎缝毛细间隙的一半,因此尽管其他条件都相同,但其 K 值也将与在大体积液体中溶解时的 K 值不同。因此,在溶解过程受控于扩散过程的条件下,用大体积液相内的 K 值来分析钎焊时的溶解问题就会带来较大误差。如果溶解过程受控于第一阶段,利用大体积液相内所得到的溶解速度常数 K 来确定钎缝的成分则是可行的。

液态中扩散的理论分析表明,扩散系数受液相温度的影响并不大。在多元液态金属中,各组元的扩散系数的差别很小,计算所得的平均扩散系数为 $D=3\times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$,基体金属溶于钎缝达到饱和所需要的时间一般是很短的,可能只需百分之几秒就够了。通常钎焊的保温时间都是以“分钟”来度量的,因此对这种饱和溶解度值较小的体系来说,无论钎缝间隙是大还是小,都会来得及完成基体金属的溶解并达到饱和溶液的程度。此时钎缝的成分仅取决于基体金属与钎料所构成的状态图中液相线的形状。也就是说,在这种情况下,保温时间和钎缝间隙对钎缝结晶区的成分无影响。

应用:波峰焊接工艺中,由于动态钎料的影响,基体金属向钎料中的溶解不易达到饱和,导致基体金属溶蚀很快,以 274°C Cu 在 SnPb 钎料中的溶解速度为 $0.18\mu\text{m}/\text{s}$ 为参考,过长的焊接时间将会导致钎料槽中的 Cu 含量短时间超标。而再流焊接工艺中,由于溶解属于静态溶解,界面层易达到饱和而减缓溶蚀,则对焊接时间不是很敏感。

2.4.3 钎料与基体金属之间的扩散

在钎焊过程中,在钎料润湿的同时就伴有扩散现象的发生,并且在此后的过程中扩散过程将继续进行。扩散本身是一种物质传输过程,在金属与合金的晶体中,原子由于热运动而导致其位置的转移。在存在浓度梯度和化学位梯度的情况下,原子的热运动可以造成物质的宏观流动,这种现象称为扩散。

1. Fick 定律

在扩散过程中,各处的浓度 C 只随距离 X 变化,而不随时间 t 变化,此时的扩散称为稳态扩散。在稳态扩散过程中,通过某一截面的扩散流量 J 与垂直于此界面方向上的浓度梯度 $\partial C/\partial X$ 成正比,其方向与浓度降低的方向一致,写成公式为:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (2.44)$$

此式即为一维条件下 Fick 第一定律的数学表达式。其中:

$$D = v\alpha^2/6 \quad (2.45)$$

式中, D 为扩散系数; v 为原子跳动频率; α 为原子跳动平均距离。

由扩散方程可以看出,决定扩散速度的参数主要有两个,一是扩散系数 D ,二是浓度梯度 $\partial C/\partial X$ 。许多因素都会影响到这两个参数,从而影响到扩散速度,主要包括扩散温度、基体金属的性质、扩散元素的性质、扩散元素的浓度、合金元素、晶格类型、固溶体类型、晶



体缺陷、磁性转变及其他因素，如固态金属中存在的应力差、温度差和电势差等。预先热处理和冷加工会改变晶体缺陷的密度和分布，也会对扩散产生影响。在多相组织中，第二相的形态、尺寸、数量和分布也会对扩散产生影响。

如果在扩散过程中，各处的浓度随时间变化，即 $\partial C / \partial t \neq 0$ ，此时通过各处的扩散流量不再相等，且随距离变化，这样的扩散称为非稳态扩散。在非稳态扩散过程中，Fick 定律具有如下形式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.46)$$

此式为 Fick 第二定律的数学表达式。在三维情况下，由于扩散系数 D 在 x 、 y 、 z 方向上可能不同，故分别用 D_x 、 D_y 、 D_z 来表示。

2. 柯肯达尔效应

Smigelskas 和 Kirkendall 于 1946 年以实验证明，在铜—锌合金中锌的扩散速率比铜大，即 $D_{Zn} > D_{Cu}$ 或 $J_{Zn} > J_{Cu}$ ，这个现象称为柯肯达尔效应。也就是说，如果两种不同金属相接触并发生扩散，接触界面要移向熔点低的金属一侧，并在低熔点金属一边形成分散的或集中的空位，其总数超过平衡空位浓度；而另一边的空位浓度将减少至低于平衡空位浓度，因此也改变了晶体的密度。在柯肯达尔试验中还发现试样的横截面同样发生了变化，如 Ni-Cu 金属经扩散后，在原始界面附近铜的横截面由于丧失原子而缩小，镍的横截面由于得到原子而膨胀。一般来说，面心立方晶格的金属相互扩散时，常表现出具有柯肯达尔效应，如 Cr-Sn、Cu-Ni、Cu-Au、Cu-Ag、Fe-Ni、Ni-Co 和 Ni-Au 等。有些体心立方晶格的金属相互扩散时，也具有这种现象，如 Ti-Cr。

由柯肯达尔效应可知，两种物质在扩散时，由于它们的扩散速度不同，界面不能均匀移动，在低熔点的金属一侧形成孔洞。这种现象在异种材料扩散连接时也经常发生，接合界面在显微镜下可以观察到扩散孔洞。

应用：解释了 Sn/Cu 等界面及其界面金属间化合物间空洞产生的原因。

3. 反应扩散过程中新相长大的动力学

在多相扩散中包括以下两个过程：一个是原子扩散过程；另一个是界面上达到一定浓度时发生化学反应，从而形成新相的过程。通常也将多相扩散称为反应扩散。

反应扩散的特点是在相界面处产生浓度跃变，且跃变的浓度与状态图中相的极限溶解度相对应。在温度和压力一定的情况下，根据相律，在双相区内各相浓度不变，而与状态图上的极限溶解度相对应，即不存在浓度梯度。图 2.45 为反应扩散时浓度分布与相图的关系。

现设纯金属 A 和 B 组成的扩散试样在各自的边际固体中有极限溶解度，分别记为 $C_{\alpha\beta}$ 和 $C_{\beta\alpha}$ （见图 2.46），设界面处浓度为常数，且物质沿 x 方向扩散，则相界面 $\xi_{\alpha\beta}$ 的移动速度为

$$\xi_{\alpha\beta} = 2A'_{\alpha\beta} \sqrt{t} = A_{\alpha\beta} \sqrt{t} \quad (2.47)$$

也就是说，新相界面移动的距离与时间成抛物线关系。

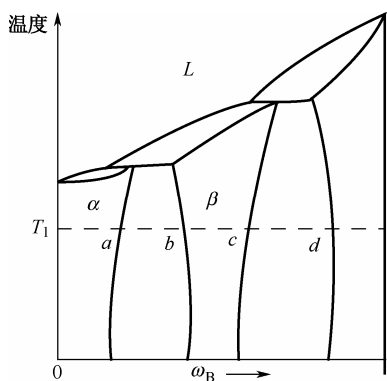


图 2.45 反应扩散时浓度分布与相图的关系

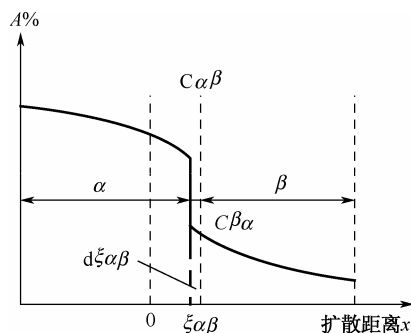


图 2.46 反应扩散时的浓度梯度

对于除了有边际固溶体之外还有中间相出现的体系（见图 2.47），设 β 相区宽度为 W_β ，仿上述方法可得

$$W_\beta = \xi_{\beta\alpha} - \xi_{\alpha\beta} = B_\beta \sqrt{t} \quad (2.48)$$

对于多相体系，则有

$$W_i = \xi_{i,i+1} - \xi_{i-1,i} = B_i \sqrt{t} \quad (2.49)$$

式中， W_i 为第 i 相的宽度； B_i 为反应扩散的速度常数。

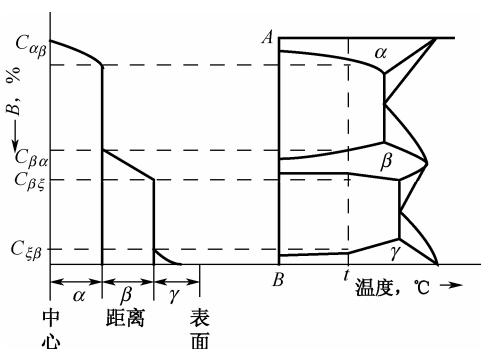


图 2.47 存在中间相时反应扩散过程中的浓度变化

应用：从理论计算上给出了界面金属间化合物的生长厚度随时间变化的关系。

4. 扩散激活能和扩散常数

晶体中，原子从一个位置移动到另一个位置必须具有一定的能量 Q ，以便克服周围原子对该原子的作用力。能量 Q 是原子脱离某位置所必须越过的能垒值，称为原子的激活能。激活能的值取决于物质本性、晶体点阵类型、激活原子种类等。此外，晶体中的缺陷也与激活能有关。一般来说，点缺陷的数量越多，激活能就越小。

实验表明，纯金属的自扩散激活能 Q 与其熔点和熔化潜热之间存在如下关系：

$$Q = 150.7 T_m \quad (2.50)$$

$$Q = 69.1 L_m \quad (2.51)$$

式中， Q 为纯金属自扩散激活能，单位为 J/mol； T_m 为金属的熔点，单位为绝对温度 K； L_m 为金属的熔化潜热，单位为 J/mol。



苏联专家布佳科夫在研究了扩散原子尺寸的影响后，提出了如下经验公式：

$$Q = Q_0 - \alpha (V_0 - V) \quad (2.52)$$

式中， Q 和 Q_0 分别为溶质原子和溶剂原子的扩散激活能； V_0 及 V 代表溶剂原子和溶质原子的摩尔原子体积； α 为系数。值得注意的是式 (2.52) 仅考虑了尺寸因素，因此存在例外情况。

扩散系数 D 在扩散过程中与晶体结构、原子尺寸、合金成分、温度等因素有关。实验结果表明在其他条件一定的情况下，扩散系数 D 与温度 T 之间满足如下关系：

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2.53)$$

式中，扩散常数 D_0 和扩散激活能 Q 与温度无关。

为了计算方便，对式 (2.53) 取对数有：

$$\ln D = \ln D_0 - Q/RT \quad (2.54)$$

利用 D 与 T 在半对数坐标系中的线性关系，可通过实验来确定 D_0 和 Q 的值，从而确定扩散系数 D 与温度 T 的关系。

应用：进行电子产品可靠性分析及寿命预测时，需对激活能和扩散系数进行获取。上述内容给出了试验获取其值的方法。

5. 扩散分类与机制

一般来说，扩散现象可以分成自扩散和互扩散两类。如果按照扩散优先发生的部位来划分，又可分为晶内扩散、晶界扩散和表面扩散等，同时包括晶格内扩散和选择性扩散。

一般认为扩散可能存在空位机制、换位机制、空隙机制、位错机制、晶界机制和表现机制等几种机制，其中空位机制的扩散激活能一般很小，易于扩散的进行。表 2.2 为银的自扩散激活能。

表 2.2 银的自扩散激活能（实验值）

扩散机制	激活能 (kJ/mol)
空位机制	185~193
位错机制	81
晶界机制	84.6
表面机制	43.6

6. 钎料组分向基体金属的扩散

根据扩散定律，钎焊时钎料向基体金属中的扩散可确定如下：

$$d_m = -DS \frac{dC}{dx} dt \quad (2.55)$$

式中， d_m 为钎料组分的扩散量； D 为扩散系数； S 为扩散面积； dC/dx 为在扩散方向上扩散组分的浓度梯度； dt 为扩散时间。

由式 (2.55) 可见，钎料组分的扩散量与浓度梯度、扩散系数、扩散时间和扩散面积有关。扩散自高浓度向低浓度方向进行，当钎料中某组元的含量比基体金属中高时，由于存在浓度梯度，就会发生该组元向基体金属中的扩散。浓度梯度越大，扩散量就越多。扩散系数



可按前述公式确定。表 2.3 列出了几种元素在 285℃下在铅中的扩散系数，数据表明，原子半径越小，扩散系数就越大。而当合金元素存在且其与扩散元素的亲和力比与基体金属的亲和力更大时，就可能使扩散系数减小，反之，则可能使扩散系数增大。

表 2.3 285℃下几种元素在铅中的扩散系数

扩散元素	原子直径 (Å)	扩散系数 (cm^2/Sec)
Ag	1.44	9.1×10^{-8}
Cd	1.52	2.0×10^{-9}
Sb	1.61	6.4×10^{-10}
Sn	1.68	1.6×10^{-10}

除了体扩散之外，钎焊时也可能发生钎料组分向基体金属的晶间渗入的情况。钎料和基体金属所构成的状态图中都具有低熔点共晶体[见图 2.48 (a) 和 (b)]。晶间渗入的产生是因为在液态钎料与基体金属接触中，钎料组分向基体金属中扩散，由于晶界处空隙较多，扩散速度较快，结果造成了在晶界处首先形成钎料组分与基体金属金属的低熔点共晶体，又由于其熔点低于钎焊温度，这样就在晶界处形成了一层液态层，这就是所谓的晶间渗入。晶间渗入的产物大都比较脆，会对钎焊接头产生极为不利的影响，尤其是在微焊接时，晶间渗入可能贯穿整个焊点而使接头脆化，因此应尽量避免接头中产生晶间渗入。

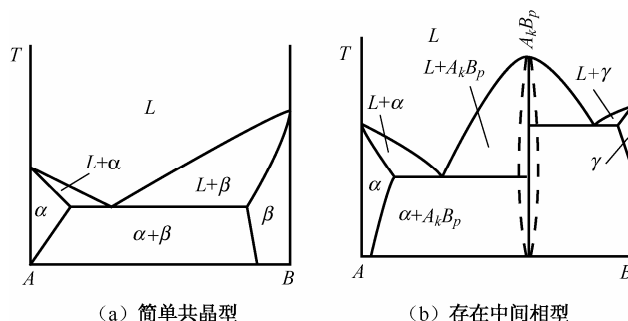


图 2.48 产生晶间渗入的系统典型状态图

2.5 界面反应组织

2.5.1 界面层结合模式

1. 互溶性基体金属与钎料结合

基体金属与钎料的结合可以形成多种多样的组织形态。在构成钎缝的三个区域中，界面区的情况是最复杂的，加热温度和加热时间等因素的影响使其进一步复杂化，并且对接头的性能也产生了很大的影响。考虑钎焊中最简单的形式，即用纯金属钎料去钎焊纯基体金属，由于发生了固、液相金属之间的溶解和扩散，所以界面处就表现出二元合金状态图所规定的



关系。因此，可以用基体金属与钎料所构成的二元合金状态图进行分类，来阐述其性质。

实际钎缝的成分常常是多元的，因而对其情况要综合考虑、具体分析。界面区组织主要包括固溶体类型、共晶体类型、金属间化合物组织。电子工业中的焊点界面一般为金属间化合物组织。化合物相一般硬而脆，对接头的机械性能有不利的影 响。当化合物分散、不连续分布时，其影响较小，且可能由于弥散强化作用而强化接头，但是当化合物形成连续层而夹在基体金属与钎料之间，且厚度较大时，其影响较大，会使接头明显变脆，强度显著下降。

为减缓界面处化合物相的生成，可在钎料中加入不与基体金属和钎料基体金属形成化合物的组元，如在 Sn 中加入 Pb 钎焊 Cu 时，可以使 Cu_6Sn_5 层减薄，当含 Pb 量达到 70% 时，化合物层甚至可能完全消失；也可在钎料中加入只能与钎料基体金属形成化合物而不与基体金属形成化合物的组元，如在 Sn 中加 Ag 钎焊 Cu 时，可在钎缝中形成 Ag_3Sn 金属间化合物，从而使 Cu_6Sn_5 层减薄。

2. 非互溶性基体金属与钎料结合

如果两种金属之间没有上述关系，彼此之间即无互溶，又无扩散，则它们之间就难以结合。但是，也确实存在异常罕见的以附着方式实现连接的现象。这种结合方式被称为附着型结合。其结合模型示意如图 2.49 所示。有人认为这种结合是由于两种金属表面的原子结晶排列发生了某种变化，或与表面原子有关的电子分布发生了变化，形成了偶极子之类的结构，以及存在的范德华力的作用而形成连接的。也有人认为是由于钎料或基体金属中混入了极少量的第二种成分而使基体金属和钎料连接到一起的。还有人认为是由于熔融的低溶金属腐蚀了高熔点金属的晶界，使低熔点的金属侵入高熔点金属这一区域并凝固而实现连接的。

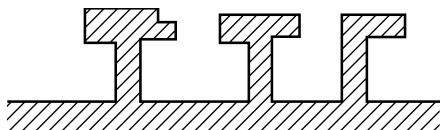


图 2.49 附着型结合 的模型示意图

应用：波峰焊接工艺中的不锈钢材料沾锡即为附着性结合，目前采用的办法为改变表面粗糙度或增加第三种物质隔离。

3. 混合型结合

大多数金属元素之间并非像上述情况那样简单，而可能是十分复杂的。在实际钎焊过程中，随着液、固相转变过程及凝固过程的进行，会发生种种反应。例如，固溶、共晶、包晶及偏晶等反应或生成化合物等情形，给结合区带来了极大的影响。目前电子工业中常用的锡基钎料焊接铜焊盘的情况更为复杂，随着温度的不同会生成不同的金属间化合物，且会发生包晶反应。

当钎料为由两种以上元素组成的合金时，要与其他基体金属钎焊，必须至少有一种元素能与基体金属钎接。实际钎焊接头的钎缝状态是非常复杂的，往往难以做出简单的说明。因此，必须用包括机械啮合等在内的各种说法来加以综合考虑和分析。

在钎焊过程中，由于基体金属和钎料之间的溶解、扩散、凝固结晶等一系列过程，以及基体金属和钎料成分的多元化和多样化，加上钎焊温度、时间、间隙等一系列工艺参数的影



响,使得钎焊接头的组织成分和性能等变得极为复杂,还需要进一步研究。

2.5.2 界面层金属间化合物的形成与生长

1. 金属间化合物的形成

当熔化的钎料和基体金属互相接触时,如果在结合界面上不存在其他任何杂质,则钎料中的锡或其他别的原子就进入基体金属的晶格而形成合金。形成合金的种类随基体金属的种类及形成合金时的温度而变化,但最终能否形成合金则取决于基体金属与钎料合金原子间的引力,即原子间亲和力的有无及大小。如果亲和力非常大则生成金属间化合物;亲和力小则生成固溶体;亲和力特别小则生成混合物;没有亲和力就不能形成合金。这里所说的混合物是微细的两种金属的混合物,而固溶体是原子的混合物。

在实际生产过程中,由于结合面金属总会被氧化而降低可焊性,而且氧化越严重,去除氧化膜的难度越高,所以一般要进行镀层保护减缓去氧化难度或提高助焊剂活性,但增强助焊剂会带来腐蚀性问题,因此优选镀层保护。镀层要求一般为 $7.5\mu\text{m}$ 左右,可以保证镀层在某些人为造成的严酷环境中老化 24h 后仍具有优良的钎焊性。当镀层厚度小于 $2.5\mu\text{m}$ 时,经过 4h 的老化后,就可能出现反润湿现象。热浸镀层的厚度常常不均匀,因而会出现局部区域涂层太薄并影响到可焊性。电镀涂层的厚度比较均匀,但镀层易呈现多孔性,并且在镀层表面下常有一些有害的有机物质,这也可能影响到可焊性。对于多孔性问题,可以通过控制电镀工艺,形成尺寸细小的晶粒来解决。较小晶粒尺寸可保证镀层表面致密光洁,因而不易氧化。

总之,钎料和基体金属之间必须形成合金,才能达到焊接的目的。焊接作为液态钎料和固态基体金属的直接接触,在其界面上形成的合金层是由基体金属的溶解反应引起的,其结果是使钎料的润湿性发生变化。各种基体金属对液态钎料的润湿性,可以看成两者的金属学的相互反应。

取一焊接部位的金相断面放在显微镜下观察,可以看到钎料和基体金属接合处所生成的合金组织,这是由于基体金属溶入液态钎料之后会产生凹凸不平现象,即在基体金属表面出现结晶颗粒。当以铜为基体金属进行焊接时,钎料中的锡和铜生成合金,在钎料侧生成 Cu_6Sn_5 (如图 2.50 所示),在基体金属侧生成 Cu_3Sn 合金,从分子式可看出此种条件下生成的合金都是金属间化合物,这是因为 Sn 和 Cu 之间有很强的亲和力。同样,当基体金属为镍或银时则生成 Ni_3Sn_4 或 Ag_3Sn (如图 2.51 所示)。

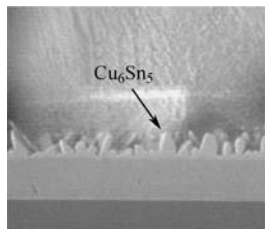


图 2.50 钎料与 Cu 基体金属界面处形成的 Cu_6Sn_5 金属间化合物

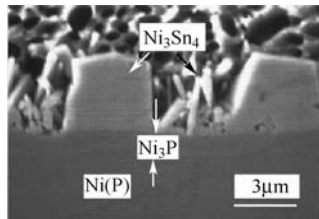


图 2.51 钎料与 NiP 镀层之间形成的 Ni_3Sn_4 金属间化合物



从以上分析可知,锡铅钎料主要靠锡和基体金属在界面形成合金达到焊接连接的目的。但对有些基体金属(如金)而言,则主要是靠铅与基体金属形成合金(Au_2Pb 、 AuPb_2)实现焊接连接。以上所说钎料中的元素与基体金属生成的合金,是液态钎料中元素的原子扩散到基体金属的晶格中的结果。扩散的速度随温度及扩散物质的浓度而变化。扩散常数与温度成指数关系,因此扩散速度受温度变化的影响显著。

在电子产品的钎焊过程中,除了铜基材和锡铅钎料之外,还经常涉及其他一些材料。在构成这些材料的各元素之间,有相当数量的体系可以形成金属间化合物,表 2.4 给出了基材金属和钎料的各元素间可能形成的金属间化合物。应该指出,表中所列的化合物多数属于成分并不确定的物相,化学式仅代表其中心的组成。

表 2.4 基体金属与钎料的各元素间可能形成的金属间化合物

金属	Ag	Al	Au	Cu	Fe	In	Ni	Pb	Pt	Sb	Sn
Ag		Ag_2Al	ss	eu	ns	Ag_3In Ag_2In AgIn_2	ns	eu	pe	Ag_3Sb	Ag_3Sn
Al			Al_2Au AlAu AlAu_2 Al_2Au_5 AlAu_4	AlCu_3 Al_3Cu_9 AlCu_3 AlCu Al_2Cu	AlFe_3 AlFe Al_2Fe Al_5Fe_2 Al_3Fe Al_5Fe		Al_3Ni Al_3Ni_2 AlNi AlNi_3	ns	PtAl_2 Pt_2Al Pt_2Al_3 PtAl Pt_5Al_3 Pt_3Al	AlSb	Eu
Au				ss AuCu_3 AuCu Au_3Cu	pe	Au_7In Au_4In Au_3In Au_7In_3 Au_3In_2 AuIn AuIn_2 Au_8In	ss	AuPb_2 Au_2Pb	ss	AuSb_2	AuSn_4 AuSn_2 AuSn
Cu					pe	Cu_4In Cu_3In Cu_9In_4 Cu_2In	ss	ns	ss CuPt Cu_3Pt	Cu_3Sb Cu_9Sb_2 Cu_2Sb	Cu_3Sn Cu_6Sn_5
Fe						Ns	ss FeNi_3		Fe_3Pt_4 FePt FePt_3	FeSb FeSb_2	Fe_3Sn Fe_3Sn_2 FeSn FeSn_2
In							In_3Ni_2 InNi InNi_2 InNi_3	pe			In_3Sn In_3Sn_4
Ni								ns	ss NiPt Ni_3Pt	Ni_3Sb Ni_5Sb_2 NiSb_2	Ni_3Sn_2 Ni_3Sn Ni_3Sn_4



续表

金属	Ag	Al	Au	Cu	Fe	In	Ni	Pb	Pt	Sb	Sn
Pb									PbPt ₃ PbPt Pb ₄ Pt	eu	Eu
Pt										PtSb PtSb ₂ PtSb	Pt ₃ Sn PtSn Pt ₂ Sn ₃ PtSn ₂ PtSn ₄

2. 金属间化合物的生长速度

电子工业中焊点界面化合物相的生长速度取决于基体金属与钎料间的原子扩散行为,由式(2.48)可知,第*i*相化合物层的厚度 W_i 与第*i*相化合物的生长速度常数 B_i 及扩散时间 t 满足以下关系:

$$W_i = B_i \sqrt{t} \quad (2.56)$$

当钎料中含有铅元素时,将会影响到化合物相的长大,这是因为化合物的生长速度常数 B_i 是与扩散体系的成分有关的。当计算钎焊接头在一定温度条件下化合物相的生长时,对式(2.56)进行修改得

$$W = W_0 + \sqrt{[D_0 \exp(-Q/RT)]t} \quad (2.57)$$

式中, W_i 为*t*时刻化合物层的厚度; Q 为扩散活化能; t 为扩散时间; R 为气体常数; W_0 为化合物层的初始厚度; T 为扩散温度; D_0 为扩散常数。

图2.52和图2.53给出了在铜与锡铅合金所构成的系统中 Q 和 D_0 随含铅量的变化情况,表2.5给出了这些体系中化合物层厚度 W 与温度 T 和时间 t 的关系。

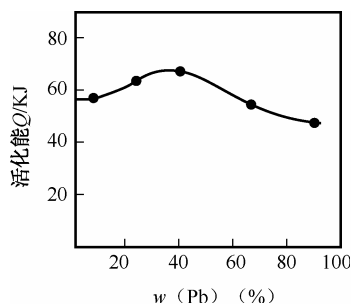
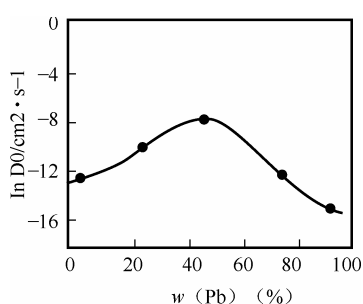
图2.52 扩散活化能 Q 随含铅量的变化图2.53 扩散常数 D_0 随含铅量的变化

表2.5 铜锡化合物的厚度与温度和时间关系

合金成分 (wt%)	铜锡化合物层的厚度 (μm)
Sn	$W = W_0 + \sqrt{2.622 \times 10^{-6} \exp(-6748.9/T)t}$
Sn ₉₅ Pb ₅	$W = W_0 + \sqrt{4.137 \times 10^{-6} \exp(-6570.8/T)t}$
Sn ₇₄ Pb ₂₆	$W = W_0 + \sqrt{3.015 \times 10^{-5} \exp(-7696.4/T)t}$
Sn ₅₆ Pb ₄₄	$W = W_0 + \sqrt{1.684 \times 10^{-4} \exp(-8426.1/T)t}$
Sn ₃₀ Pb ₇₀	$W = W_0 + \sqrt{2.356 \times 10^{-6} \exp(-6882.1/T)t}$
Sn ₁₀ Pb ₉₀	$W = W_0 + \sqrt{1.222 \times 10^{-7} \exp(-5891.0/T)t}$



3. 金属间化合物的生长形态

铜与液态锡基钎料发生界面反应可生成 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 金属间化合物层。 Cu_6Sn_5 有两种晶体结构，在室温下是稳态 η 相，该相具有有序长程超晶格结构。在焊接及随后的冷却过程中，这种低温结构转变所需的时间往往不足，因此高温 Cu_6Sn_5 结构，即 η 相就会残留下来作为一种亚稳相存在。 Cu_6Sn_5 的平衡转变温度是 186°C ，但当温度接近室温时，因为动力学方面的限制，在一定的时间内这种转变不会发生。当温度稍高于 150°C 后，这种转变所需时间就大大减少。通过示差扫描热量计可以观察到在 175°C 保温 6min 后，这种转变就会开始发生。 Cu_3Sn 也具有有序长程超晶格结构，但是其有序温度并不像 η 相那样明确。除了有序转变外，金属间化合物的厚度在服役期内也会明显增加。

当铜与液态钎料接触时，铜迅速溶解。起初这种溶解是一种不平衡的过程，并且很快在铜与液态钎料界面达到很高浓度，但是由于过量的铜原子会沉积到铜表面，所以界面处的铜浓度很快会降低到亚稳定溶解度。在此条件下，由于铜与锡原子之间存在很大的化学反应驱动力，所以很快就会生成不均匀形核和生长的 Cu_6Sn_5 ，其形态多为扇贝状，也会形成 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 复合层，如图 2.54 所示。 Cu_3Sn 在焊接过程中一般都会形成，但厚度小很多，很难观察到，其出现多见于高温老化后。 Cu_6Sn_5 焊接后多为扇贝状，而在后期生长过程中多呈管状和纤维状，且纤维状一般位于共晶组织中，如图 2.55 所示。焊接过程中如果冷却速率较大，则 Cu_6Sn_5 多为平直状；如果冷却速率较小，则多为扇贝状，其原因与 Cu 在 Sn 中的扩散路径及浓度差有关。当初始非均匀成核形成后，Cu 原子必须通过 Cu_6Sn_5 进入 Sn 基钎料，如果通过如图 2.56 所示的路径 2 扩散，则很快 Cu 浓度局部饱和，而通过路径 1 扩散，已形成的扇贝状边际线会辐射更多面积，提供更多的 Cu 原子吸收能力，则不易达到饱和。这样 Cu 原子就源源不断远距离输送，形成扇贝状化合物层。

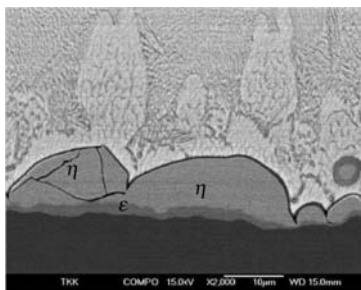


图 2.54 高温老化后 Sn-Cu 界面的化合物形态

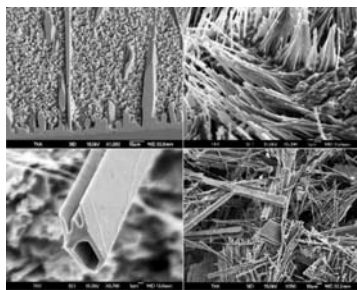


图 2.55 Cu_6Sn_5 形态：管状及纤维状

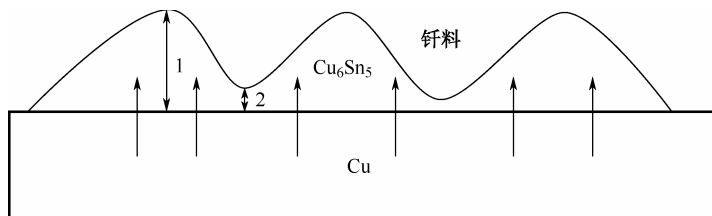


图 2.56 铜原子扩散路径示意图



2.6 钎焊接头性能及接头设计

2.6.1 钎焊接头性能

钎焊接头也称焊点，具有一定的耐热性、硬度、耐腐蚀性及匹配的热膨胀系数。在耐热性方面，由于通常情况下钎料的熔点低于基体金属，因而焊点的耐热性主要受钎料耐热性的制约，同时也受钎料成分变化的影响；在硬度方面，由于焊接过程中的二次合金化，接头的硬度会比钎料或基体金属的硬度增加、韧性减弱，即预示着接头机械性能的恶化，接头易于断裂；在耐腐蚀性方面，由于不同金属成分之间存在不同的电极电位，所以潮湿情况下因水解等作用的存在会形成原电池反应，造成电化学腐蚀。表 2.6 给出了一些金属的电极电位，腐蚀的顺序和程度与金属的离子化倾向大小存在密切关系。钎焊接头的耐腐蚀性还与钎缝界面区及扩散区的组织形态有关。一般界面结合比较差，在界面处常常存在一些空隙和微孔，从而促进了缝隙腐蚀的发展。

表 2.6 一些金属及合金的电极电位（1N NaCl+0.3% H_2O_2 溶液，0.1N 甘汞电极）

金属或合金	电极电位 (V)	金属或合金	电极电位 (V)
Mg	-1.75	Pb	-0.55
Zn	-1.10	Sn	-0.49
Al	-0.83	Cu	-0.20
Cd	-0.83	Bi	-0.18
Fe	-0.63	Ag	-0.08
Cr	+0.02	Ni	-0.07
离子化倾向			
大 \leftarrow Mg、Al、Mn、Zn、Cr、 Fe^{II} 、Cd、Co、Ni、Sn			
Pb、 Fe^{III} 、Sb、Bi、Cu、Ag、Hg、Pt、Au \rightarrow 小			

2.6.2 钎焊接头强度

钎焊接头虽然是依靠钎料熔化后填满间隙而形成的，但它的强度并非简单地由钎料的强度所决定，其强度还将取决于包括钎焊过程中的各种金属学因素（基体金属、钎料合金、助焊剂、气氛、界面组织等性能及相互作用）、工艺因素（温度、时间、加热速率和压力）、接头几何参数（焊缝间隙、钎着面积与钎着率）和使用因素等在内的综合作用情况。例如，对于钎焊温度，为保证钎料合金的结晶点阵彻底解体，促进钎料的流动，钎焊温度通常取钎料熔点（液相线）以上 $20\sim 40^\circ\text{C}$ 。适当提高钎焊温度可以减小钎料的表面张力，改善润湿和填缝条件，并使钎料和基体金属充分相互作用，有益于提高接头强度。但温度过高，可能导致钎料与基体金属的相互作用过分造成溶蚀、形成连续的脆性金属间化合物、产生晶间渗入及晶粒过分长大等问题，并因而使接头强度降低。试验发现，用 SnPb 钎料钎焊 Cu 时，在 250°C 时钎焊强度达到最大值。然而若继续提高钎焊温度，则使 Cu_6Sn_5 相迅速增加，形成连



续的化合物层,使接头变脆,抗拉强度会迅速下降(如图 2.57 所示)。对于钎焊时间,则要考虑被焊产品加热、生成合金及助焊剂挥发 3 个方面所需要的时间。

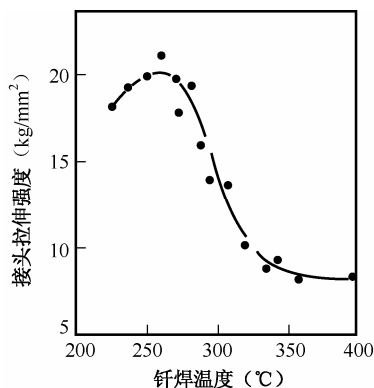


图 2.57 SnPb 钎焊 Cu 接头的强度随钎焊温度的变化

1. 钎焊接头几何参数对强度的影响

(1) 钎缝间隙与接头强度的关系

钎缝间隙是指接头结合表面之间的距离,对接头的机械性能有很大影响。无论是何种接头形式及何种载荷(包括静载荷、疲劳载荷、冲击载荷等),都与接头间隙有密切的关系。接头间隙对机械性能的影响主要包括以下几个方面:

- ① 由于基体金属的强度较大,就产生了阻止钎料塑性流动的纯机械作用;
- ② 间隙的变化会影响到钎缝中产生夹渣和气孔的可能性;
- ③ 接头厚度与毛细作用及钎料填缝作用之间的关系。

钎缝间隙的大小应考虑特定温度下各种条件对它的影响。对于横截面大体相当的同种金属,钎焊时,只需考虑其在室温下的间隙就可以取得满意的结果,而当钎焊异种金属时,应根据两部件的相对位置和形状来分析,膨胀系数大的金属部件在受热过程中会使间隙增大或减小。因此,对于异种金属部件的钎焊,要通过调整室温下的间隙来保证钎焊温度下的间隙,从而获得最大的接头强度。一般来说,存在一个可使接头达到最大强度的最佳间隙,当接头的间隙小于此最佳间隙时,由于间隙内的助焊剂和气体难以完全排除,或钎料流入困难,致使钎缝中的不致密缺陷增加,夹气、夹渣明显,因而会降低接头的强度;而当钎缝间隙大于此最佳间隙时,毛细作用减弱,钎料难以填满钎缝间隙,并且钎缝中易出现柱状晶铸造组织及枝晶偏析,因而也会导致接头强度下降。电子工业中的钎缝间隙为 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ 处出现强度最大值。值得注意的是,对于不同的基体金属、钎料和助焊剂组合,其最佳间隙值也不同。当钎料对基体金属的润湿性较好且它们之间的相互作用较小时,间隙一般也可以比较小;而当其间的相互作用比较强烈时,由于基体金属溶入液态钎料后会使钎料的熔点升高,流动性下降,故宜增大间隙。

(2) 钎着面积及钎着率

钎焊时钎缝中易出现夹气、夹渣等不致密性缺陷,并且间隙过大或钎料量不足时还会出



现未钎透,这将使钎焊接头的实际连接面积小于接头面积。应用中将实际钎着面积 S_r 与钎缝面积 S_b 的比值称为钎着率 γ , 即

$$\gamma = \frac{S_r}{S_b} \quad (2.58)$$

大多数情况下,钎着率只能达到 70%~90%。钎着率低,意味着钎缝实际承载的面积下降,因此会使接头的承载能力下降。

由于钎料本身性能的限制,钎缝是很难达到与基体金属等强度的。因此,为提高钎焊接头的承载能力,一般都采用增大接头面积(如增大搭接面积)的方法。但是这种方法并非总是有效的,在接头承载能力增加(接头面积增加)的同时,单位面积钎缝的强度却是下降的,其具体原因还不是十分明确。可能的原因是,随着钎缝面积的增加,夹气、夹渣等不致密性缺陷的数量会增大,致使钎着率下降,从而导致钎缝强度下降。另外,钎缝内部的应力分布是不均匀的,这种不均匀的应力分布与接头的几何尺寸之间存在密切的关系。因此,要想提高接头的承载能力,不能单纯依靠增加接头面积的方式,而应综合考虑接头面积、间隙、钎着率、基体金属强度和钎料强度等因素。图 2.58 给出了钎缝间隙、接头面积和基体金属强度等因素对于对接接头和搭接接头的强度的影响规律。在进行接头设计时,这些变化趋势是应予以充分考虑的。

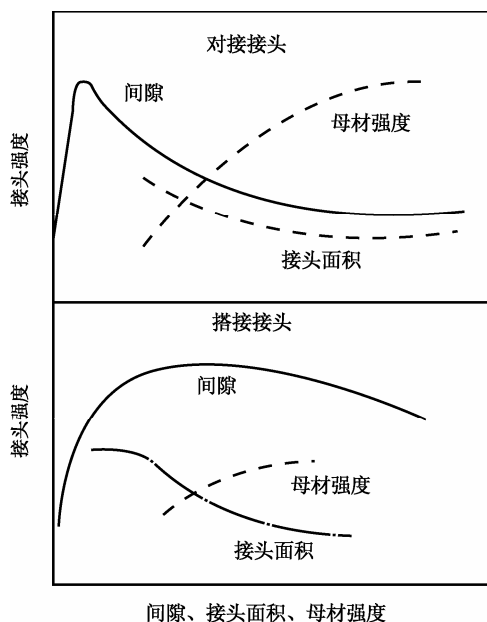


图 2.58 各影响因素与接头强度的关系

(3) 钎焊接头的疲劳强度、蠕变强度及高温强度

由于钎缝的组织状态比较复杂,加上可能存在一些致密性缺陷,所以当钎焊接头承受循环应力作用时,其疲劳强度要比基体金属的值低,一般只能达到基体金属疲劳强度的 50%~60%。其次,金属在高温下会发生蠕变断裂。蠕变是在金属的再结晶温度以上发生的,对于在常温下就发生再结晶的金属,常温下就会发生蠕变。所谓蠕变,就是长时间承受恒定载荷



时的变形与断裂行为。钎焊接头在承受静载拉伸时的强度比较高,但在长时间承载时,其强度显著降低。对于这类问题,在使用中应给以充分的考虑。另外,高温强度对耐热合金这类金属的钎焊接头具有重要意义。一般随着试验温度的升高,相应的强度值下降,这与钎料及基体金属本身的强度随温度的变化趋势是一致的。

2. 钎焊接头的设计

为保证产品质量和提高钎焊结构的安全可靠性,研究、了解钎焊接头的设计原则,提高接头和结构的性能具有重要的意义。

由于钎焊结构的千变万化,实际的钎焊接头可能有各种形式。但就两被连接工件之间的相对位置来看,不外乎为对接、搭接、角接和 T 形接头几种基本形式(见图 2.59),其中加强型接头为搭接接头,用以解决钎料强度低于基体金属而早期失效的问题。所述这几种基本形式的变化和组合会产生各种各样的接头形式(见图 2.60),而多样的接头形式体现在电子工业中,主要表现在元器件焊端或引脚形式上,如矩形片式焊端、圆柱体帽型焊端、翼型引脚、J 形引脚、城堡型焊端、无引线焊端等。

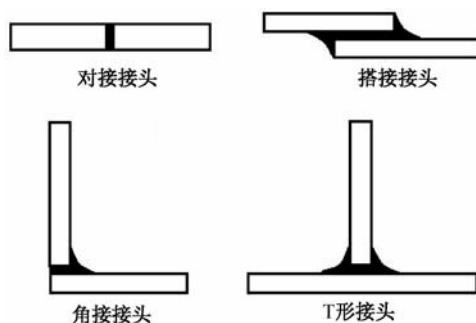


图 2.59 钎焊接头的几种基本形式

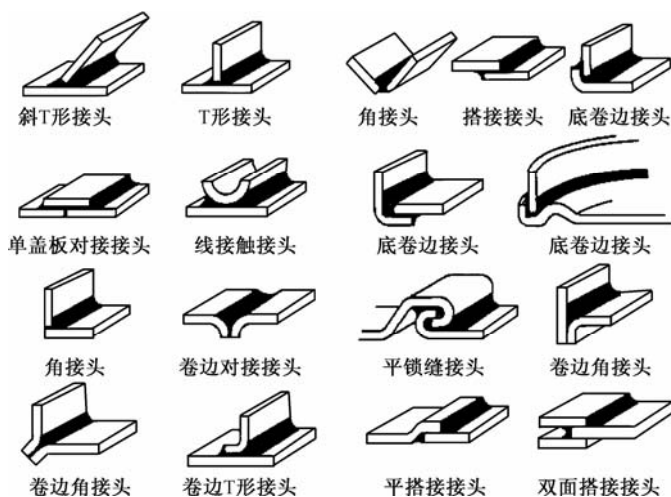


图 2.60 不同形式的钎焊接头

熔融钎料填缝时,毛细能力起很大作用,并且与钎缝间隙的大小有关。钎焊间隙是指在实施钎焊的条件下基体金属结合面之间的距离,这与室温下的装配间隙是不完全相同的。由



于钎焊间隙的大小对接头有着明显的影响,并且不同形式的接头和不同类型的载荷,以及不同的基体金属和钎料组合对间隙都有着不同的要求,所以钎焊接头间隙的确定是一个非常复杂的问题。通常在确定接头间隙时要考虑以下几方面的因素:

① 基体金属与钎料的匹配及其机械性能,如拉伸强度、剪切强度、弹性模量、剪切弹性模量等;

② 钎焊接头的形式,如对接、搭接、角接等;

③ 钎料与基体金属间的相互作用,如溶解、扩散、偏析、晶粒长大等;

④ 钎焊缺陷及钎着率等。

目前,大量数据表明,最佳间隙在 $0.01\sim 0.2\text{mm}$ 之间,具体数值视基材种类而定。

思考题

1. 简述软钎焊接技术的工艺步骤。
2. 简述软钎焊接技术的加热方式。
3. 简述可焊性及润湿性之间的关系。
4. 简述杨氏方程的内容及应用。
5. 简述润湿性影响因素。
6. 简述钎料与基体金属之间的溶解与扩散现象。
7. 简述扩散现象对金属间化合物生长的影响。

第3章 现代电子装联软钎焊 应用材料



本章要点

- 📁 钎料合金概述及其工艺性要求
- 📁 助焊剂概述及其工艺性要求
- 📁 钎料膏概述及其工艺性要求
- 📁 其他钎料形态概述
- 📁 无铅化兼容性问题



软钎焊技术中应用的电子材料主要包括钎料合金、助焊剂、钎料合金与助焊剂的组合体（钎料膏、带芯钎料丝）及红胶等。电子材料是电子组装的基石，它涉及电子技术、物理化学、固体物理学和工艺基础等多学科知识。

3.1 钎料合金概述及其工艺性要求

3.1.1 钎料合金概述

钎料合金主要是由两种或两种以上金属元素组成的具有一般金属特征的合金材料。以形态分类，钎料主要有棒状钎料、丝状钎料、膏状钎料和预成型钎料，分别用于波峰焊接工艺、手工焊接工艺和再流焊接工艺。以成分分类，钎料主要包括有铅钎料和无铅钎料。传统的钎料合金以锡（Sn）、铅（Pb）为主要成分，简称锡铅合金。由于对环境保护的关切，工业界促使现代电子装联向无铅化的方向发展，即钎料合金已不再含有铅成分，这类材料简称为无铅合金，相应的焊接技术也称为无铅焊接技术。然而，对无铅焊接技术的研究还远未取得像锡铅焊接那样的成果，所开发的无铅合金也有着各自的优点和不足。因此，从焊接合金入手了解目前所开发的无铅钎料合金的成分、组织和性能特点，对正确制定焊接工艺具有重要的意义。

1. Sn-Pb 钎料特点

纯 Sn 的熔点是 232°C ，纯铅的熔点是 327°C ，不同比例的 Sn 与 Pb 混合在一起，将形成具有不同熔化温度的钎料合金，其力学性能也有很大的不同。当 Sn 的含量达到 $60\text{wt}\%\sim 63\text{wt}\%$ 时，Sn-Pb 之间可以形成共晶合金，其熔点仅为 183°C 。图 3.1 为 Sn-Pb 二元合金相图，图 3.2 为 Sn-Pb 二元合金组织。当综合考虑机械性能、导电性、流动性和漫流面积等因素时，共晶钎料具有综合性能最优的特点（见图 3.3），且不会出现半熔化的液固两项共存状态，减少了焊点疏松、外观粗糙、强度降低等现象，因此在电子组装行业应用最为广泛的的就是 Sn37Pb 及 Sn40Pb 钎料合金。

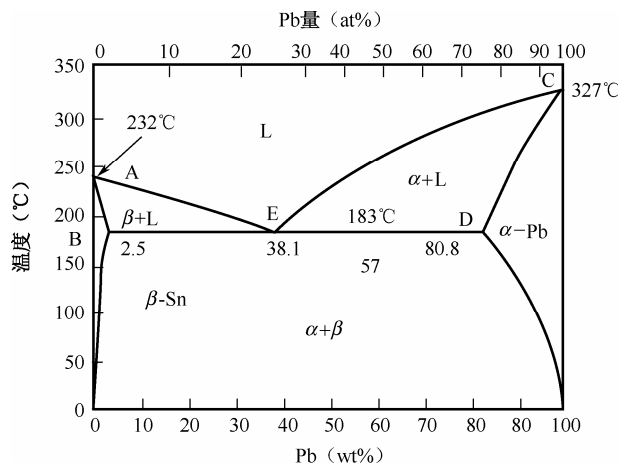


图 3.1 Sn-Pb 二元合金相图

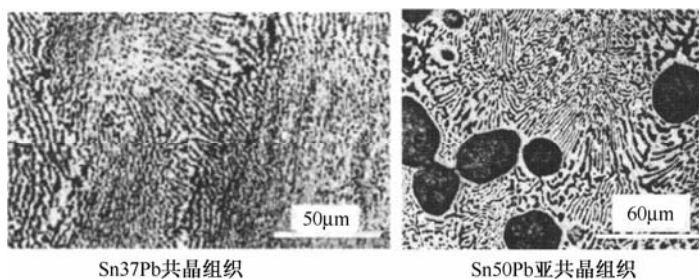


图 3.2 SnPb 二元合金组织

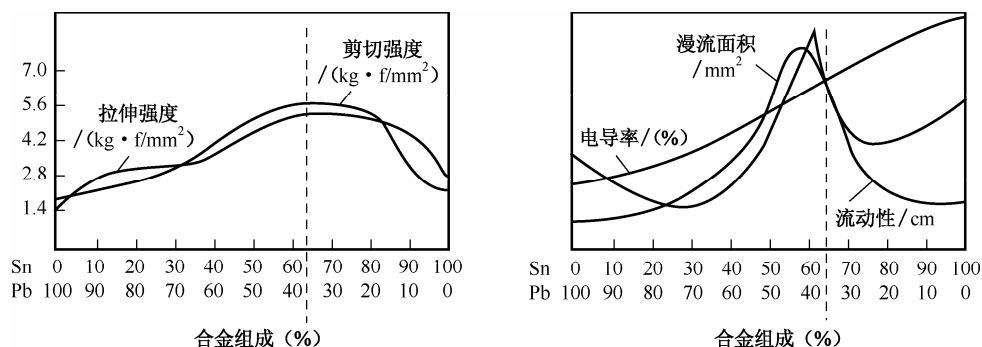


图 3.3 合金成分与机械强度、电导率及物理特性关系图

SnPb 钎料合金中 Pb 的作用主要表现在以下几个方面。

① 有效降低合金的表面张力，进而促进润湿和铺展。

② 有效抑制锡的相变。纯 Sn 在冷却到 13.2℃ 以下时会发生相变，导致 26% 的体积变化，进而破坏结构完整性，导致俗称“锡瘟 (tin pest)”的可靠性问题。但纯 Sn 中含有 Pb（事实上，其他杂质元素，如 Al、Sb、Zn、Bi 等的存在也可以起到相同作用）时就可以有效地抑制上述相变的发生。

③ 由图 3.1 可见，当 SnPb 合金中 Pb 的含量在 85wt%~95wt% 时，SnPb 合金的熔点（液相线温度）在 300℃ 左右，这一成分的钎料目前在电子工业中广泛用作高温钎料，特别是需要承受二次焊接的场合，如 BGA 等器件焊球，其最大的特点是固相线和液相线之间的温差较小，因此其凝固与熔化的温度区间较窄，从而具有良好的工艺性能。

另外，为了改善 SnPb 钎料的机械性能，同时抑制镀银材料在焊接时银镀层的溶蚀，进而影响其润湿性，常添加 1.5wt%~2wt%Ag，形成 SnPbAg 钎料并得以应用。

2. 无铅钎料定义

PCBA 组件上的铅主要是通过钎料进入的（当然还有一小部分是元器件封装材料、PCB 上油墨等进入的），因此无铅钎料在无铅化电子组装中占有极其重要的地位。无铅钎料并不意味着钎料中 100% 不含有铅，只是对铅这种杂质元素的含量有一个限制。表 3.1 和表 3.2 是 ISO 9453、日本 JIS Z 3282 等国际标准针对二元合金的无铅钎料杂质含量做出的规定，即铅含量要小于 0.1wt%，即小于 1000ppm。



表 3.1 ISO 9453 标准中关于无铅钎料成分的规定 (wt%)

合金	Sn	Pb	Sb	Bi	Cd	Cu	In	Ag	Al	As	Fe	Zn
Sn1Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	0.45~0.9	0.05	0.05	0.001	0.03	0.02	0.001
Sn3Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	2.5~3.5	0.05	0.05	0.001	0.03	0.02	0.001
Sn3Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.1	0.05	3.0~3.5	0.001	0.03	0.02	0.001
Sn4Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.05	0.03	3.5~4.0	0.001	0.03	0.02	0.001
Sn5Sb	Rem	0.1	4.5~5.5	0.1	0.002	0.1	0.05	0.05	0.001	0.03	0.02	0.001

注：各种杂质元素的质量百分比为其含量的最大允许值。

表 3.2 日本 JIS Z 3282 标准中关于无铅钎料成分的规定 (wt%)

合金	Sn	Pb	Ag	Sb	Cu	Bi	Zn	Fe	Al	As	Cd
Sn1Cu	Rem	0.1	0.05	0.05	0.45~0.9	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002
Sn3Cu	Rem	0.1	0.05	0.05	2.5~3.5	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002
Sn5Sb	Rem	0.1	0.05	4.5~5.5	0.05	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002
Sn3Ag	Rem	0.1	3.0~3.5	0.1	0.1	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002
Sn3.5Ag	Rem	0.1	3.2~3.8	0.12	0.05	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002
Sn4Ag	Rem	0.1	3.5~4.0	0.1	0.05	0.1	0.002	0.02	0.002	0.03	0.002

注：各种杂质元素的质量百分比为其含量的最大允许值。

表 3.3 为目前可供选择的无铅钎料合金体系。针对手工烙铁焊、浸焊和波峰焊应用而言，一般推荐使用 Sn-Cu 系二元无铅共晶钎料，主要有以下几方面理由。

表 3.3 可供选择的无铅钎料合金体系

合金成分 (wt%)	熔点 (℃)
Sn80Au	280
Sn5Sb	234~240
Sn0.7Cu	227
Sn3.5Ag	221
SAC	217~221
Sn9Zn	198
Sn37Pb	183
Sn58Bi	138
Sn52In	120

- ① 由于无铅钎料各组元元素之间的熔点差别很大，因此应该尽可能选用最简单的二元合金，否则组元元素越多，就越难形成均匀的显微组织。
- ② 就软钎焊而言，具备共晶成分的钎料合金，其综合焊接性能最好。
- ③ SnCu 钎料的实用性已经被广泛证实，早在 2000 年美国 NEMI 向北美工业界推荐无铅钎料时就建议无铅波峰焊使用 Sn0.7Cu 钎料。
- ④ SnCu 钎料在所有无铅钎料中的成本最低。

由于电子元器件耐热冲击性能的限制，再流焊的峰值温度一般不可以超过 250℃，而无铅钎料的熔点又很高，这就导致无铅再流焊的工艺窗口很窄。针对无铅再流焊应用而言，一



般推荐使用 Sn-Ag 或 SAC 系无铅钎料。Sn-Ag/SAC 系列无铅钎料的熔点要比 Sn-Cu 系列低 6°C 左右, 这对于工艺窗口很窄的无铅再流焊而言是非常重要的。因此, 在 Sn-Cu 系合金的性能没有取得突破性进展之前, 目前只能推荐使用价格较为昂贵的 Sn-Ag/SAC 系列。

3. 无铅钎料合金相图及特点

(1) Sn-Cu 系钎料合金相图及特点

Sn-Cu 系钎料合金相图如图 3.4 所示, 钎料熔点随成分变化而变化。随着 Cu 含量的不断增加, 熔点不断提高, 钎料黏度增加, 润湿性变差。Sn-Cu 系钎料共晶成分为 Sn0.7Cu, 熔点为 227°C , 结晶组织为 β -Sn+SnCu 共晶细条状组织, 如图 3.5 所示。Cu 几乎不能固溶于 Sn 中, 主要以 Cu_6Sn_5 化合物形式存在, SnCu/Cu 界面化合物包括 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 两种。Sn-Cu 系钎料合金价格便宜, 力学性能和焊点可靠性相对较差。SnCu 共晶组织中的 Cu_6Sn_5 化合物不稳定, 且随着温度的升高或时间的延长变得粗大。

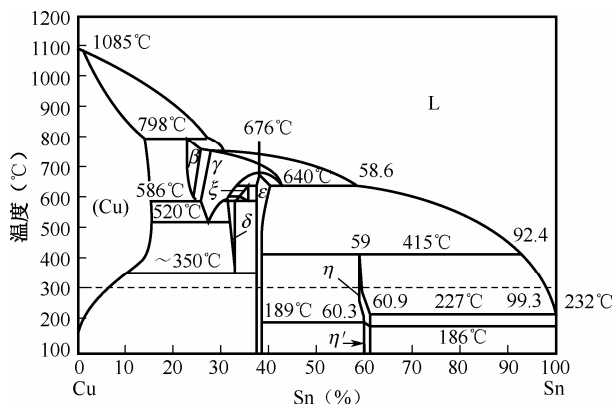


图 3.4 Sn-Cu 系钎料合金相图

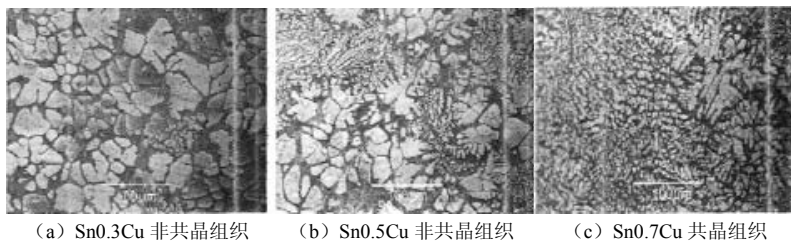


图 3.5 Sn-Cu 系钎料合金组织

(2) Sn-Ag 系钎料合金相图及特点

Sn-Ag 系钎料合金相图如图 3.6 所示, 共晶成分为 Sn3.5Ag, 熔点为 221°C , 结晶组织为 β -Sn+SnAg 共晶细微层状组织, 如图 3.7 所示。Ag 几乎不能固溶于 Sn 中, 主要以 Ag_3Sn 化合物存在, SnAg/Cu 界面化合物包括 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 。Sn-Ag 系钎料合金价格贵, 力学性能不低于 Sn-Pb 系钎料, 当 Ag 含量超过 3.0% 时, 合金抗拉强度和 0.2% 屈服强度显著超过 SnPb 共晶钎料; 当 Ag 含量超过 3.5% 后, 合金机械强度会出现下降趋势。SnAg 共晶组织中



的 Ag_3Sn 化合物稳定, 且随着 Ag 含量的增加, Ag_3Sn 会变得粗大。

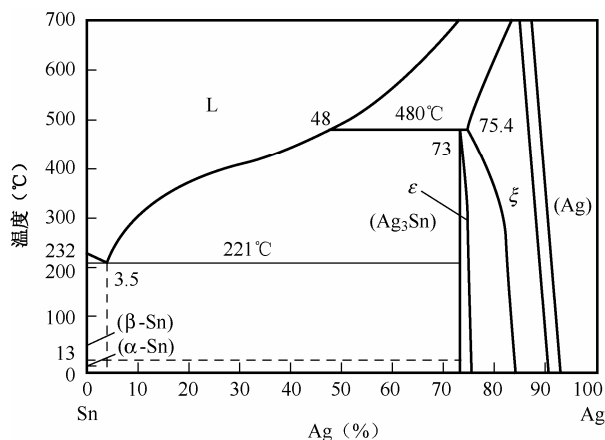


图 3.6 Sn-Ag 系钎料合金相图

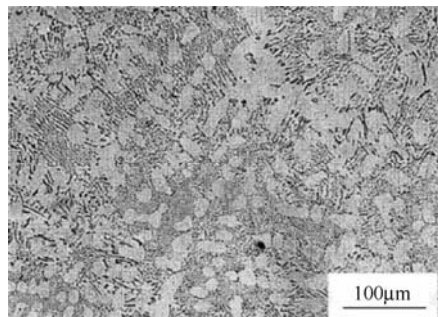


图 3.7 Sn-Ag 系钎料合金共晶组织

(3) Sn-Bi 系钎料合金相图及特点

Sn-Bi 系钎料合金相图如图 3.8 所示, 共晶成分为 $\text{Sn}58\text{Bi}$, 熔点为 138°C , 结晶组织为 $\beta\text{-Sn}+\text{SnBi}$ 共晶细微颗粒状组织, 如图 3.9 所示, 具有良好的抗拉强度、蠕变性能和抗疲劳性能, 适用于低温软钎焊。值得注意的是, Bi 的脆性使得 $\text{Sn}58\text{Bi}$ 的延展性不高, 因此难以拉成丝状。Bi 还有较高的膨胀性, 也使得合金化后产生较高的内应力, 耐热性不好。另外, 含 Bi 的 Sn 基合金对 Pb 很敏感, 易形成 SnBiPb 三元低溶共晶组织 (固化温度仅为 96°C), 焊后易产生剥离。

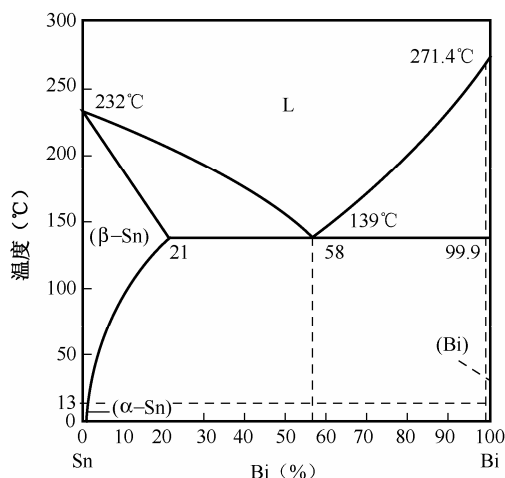


图 3.8 Sn-Bi 系钎料合金相图

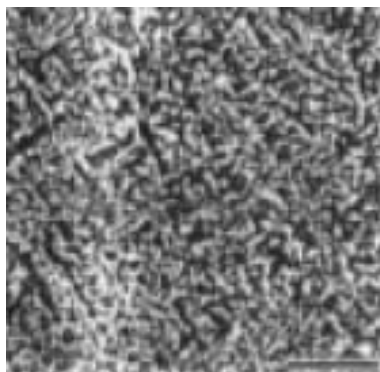


图 3.9 Sn-Bi 系钎料合金共晶组织

除上述典型二元合金外, 还有 Sn-Sb 系钎料合金 (典型成分为 $\text{Sn}5\text{Sb}$, 熔点为 $232\sim 240^\circ\text{C}$); Sn-Zn 系钎料合金 (共晶成分为 $\text{Sn}8.9\text{Zn}$, 熔点为 198°C) 及 Sn-In 系钎料合金 (共晶成分为 $\text{Sn}51\text{In}$, 熔点为 120°C) 等。



(4) Sn-Ag-Cu 系钎料合金相图及特点

在二元共晶钎料的基础上, 为了进一步降低熔化温度, 改善润湿性和增加接头强度, 常加入第三种、第四种, 甚至更多种金属以形成三元或多元合金钎料, 多为非共晶或近共晶钎料。最常见的就是 SAC 三元合金钎料, 其熔点比 SnAg 共晶钎料低, 抗拉伸强度和蠕变性能都优于 SnPb 共晶钎料, 具有润湿性好、抗热疲劳、可靠性好等优点。SAC 钎料合金的典型成分为 SAC305, 熔点范围为 217~221℃。图 3.10 为 SAC 钎料合金相图及组织, 由图可知其结晶为非共晶组织, 由树枝状 Sn 基体和共晶相组成, 其中共晶相包括二元共晶相 (Sn+Cu₆Sn₅)、(Sn+Ag₃Sn) 和三元共晶相 (Sn+Cu₆Sn₅+Ag₃Sn), 与铜焊盘界面化合物包括 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn。组织中共晶相的形成先后顺序与钎料成分有关, 如 SAC305 亚共晶钎料合金, 冷却时相的形成依次为: 液体→形成 Sn 初晶→形成 Sn/Ag₃Sn 共晶→形成 Sn/Ag₃Sn/Cu₆Sn₅ 共晶。如图 3.11 所示的 SAC 钎料合金冷却过程中成分与化合物的形成对应状态图很好地说明了这一点。

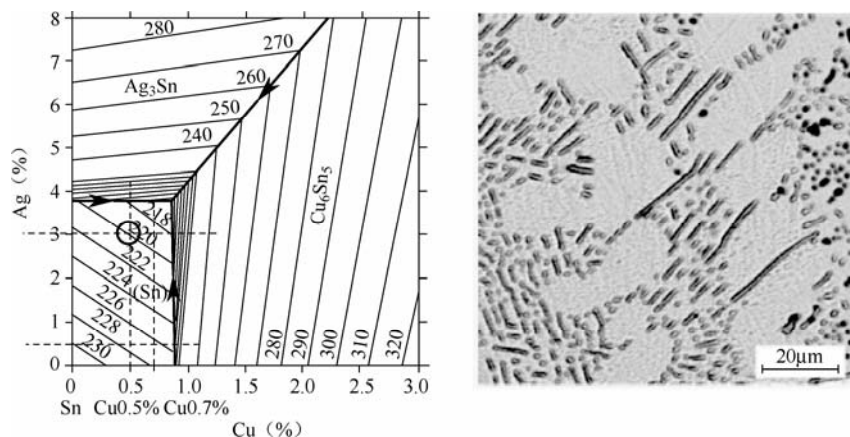


图 3.10 SAC 钎料合金相图及近共晶组织

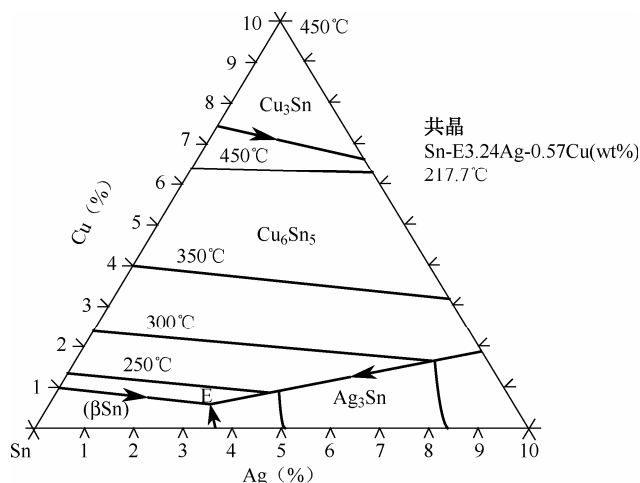


图 3.11 SAC 钎料合金冷却过程中成分与化合物的形成对应状态图



3.1.2 钎料合金的选择与使用

1. 钎料合金选用的基本原则

钎料合金的选择,可具体从以下几个方面考虑。

- ① 尽量选择钎料的主成分与基体金属主成分相同的钎料。
- ② 钎料的液相线要低于基体金属固相线至少 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。
- ③ 钎料的固相线与液相线的温度差要尽可能小,否则将造成工艺上的困难,且温度差过大还易引起熔析。
- ④ 钎料中的某一重要组元应能与基体金属产生液态互溶、固溶或固液异分化合物的相互作用,从而能够形成牢固的结合。
- ⑤ 钎料的主要成分与基体金属的主要成分在元素周期表中的位置应尽量靠近,如此引起的电化学腐蚀较小,也即接头的抗腐蚀性好。
- ⑥ 在钎焊温度下,钎料的主要成分应具有较高的化学稳定性,即具有较低的蒸汽压和低的氧化性,以免钎焊过程中的钎料成分发生变化。
- ⑦ 钎料具有良好成型加工性能,以便能制成丝、棒、片、箔、粉等型材。

2. 钎料合金选用的工艺性能要求

在选择使用钎料合金时,大体需要考察合金的经济性、焊接的工艺性和装联的可靠性三个方面的因素。钎料的工艺性主要涉及合金的熔化温度、熔化和固化特性、表面张力(润湿性)、界面反应特性和热膨胀系数、强度与可靠性、抗腐蚀性、抗氧化性(成渣性)、抑制锡瘟与锡须特性。熔点主要影响焊接工艺窗口(详见本书的 4.2.4 节),表面张力主要影响钎料的润湿性(详见本书的 2.2 节),强度与可靠性主要影响焊点的强度与可靠性(详见本书的 9.3 节及 9.4 节),抗腐蚀性主要与抗电化学腐蚀相关,而抗氧化性主要与波峰焊中的锡渣产生量相关。

焊接工艺性对形成可靠焊点、提高焊接质量和企业经济效益都具有重要的意义。而从焊接工艺性方面考虑,共晶成分的钎料合金通常都是优先考虑的焊接材料,因为它主要具有以下优点。

(1) 良好的辅展性

共晶合金具有固定的熔点,无论是熔化还是凝固过程,理论上都是在此恒温下完成的。这一特点对焊接时的液态钎料在被焊金属表面润湿、铺展来说非常重要。如果合金需要经历一个液、固共存的半液化状态,则会由于高的黏性而降低液态合金的流动性,这对焊接时的钎料铺展不利。

(2) 良好的机械性能

共晶合金的结晶是在其熔点一次完成的,因此其显微组织通常都是微细交织的组织结构(共晶组织)。纤细的晶粒和均匀交织的组织结构正是增强合金强度、延展性等机械性能的主



要因素。

(3) 方便的工艺控制

因为共晶合金具有固定的熔点,所以采用共晶合金作为焊接材料时,焊接的加热温度理论上只要稍高于合金的熔点即可将其全部熔化,这对焊接的工艺控制是很有利的。否则,对亚共晶或过共晶合金加热时,需要考虑将材料加热到液相温度以上,同时,结晶时的“似固非固”的半熔化状态也增加了自动焊接过程中因振动等干扰对焊点质量、外观等的影响。

(4) 一定的鲁棒性

焊接时的界面反应不可避免地改变了界面附近的合金成分,这对许多钎料的熔化温度范围和材料的其他性能都将产生影响。例如,铜含量升高将引起包括 Sn-Cu、Sn-Pb 合金在内的许多钎料合金的熔点升高、半熔化状态出现等。采用共晶合金时,只要界面反应引起的合金成分变化不大,这种影响通常也将处于可预期的范围之内。

3. 无铅钎料合金选用的注意事项

选择无铅化钎料合金时首先需考虑相关金属元素的毒性问题及成本问题。现在以 Sn 为基体的无铅钎料的成本高出传统 Sn-Pb 钎料很多,尽管要付出生产成本方面的代价,但无铅钎料必须引起广泛重视,这主要是因为 Pb 为有毒有害的金属元素。如果按照 OSHA PEL 和 ACGIH TLV 数据,相关金属元素的毒性大小排序为: Bi < Zn 氧化物烟尘 < Sn (无机物) < Cu 灰尘 < Sb 及其化合物 < Sn (有机物) < Cu 烟尘 < In 及其化合物 < Ag 灰尘及烟尘 < Ag 及其可溶解化合物 < Pb (无机物); 如果按照慢性毒性,相关金属元素的毒性大小排序为: Bi < In < Zn (氧化物) < Cu < Ag < Sn < Sb < Pb; 而表面组装协会的研究报告给出了如下排序: Bi < Zn < In < Sn < Cu < Sb < Ag < Pb。由此可见, Pb 是合金元素中毒性最大的元素,一定要严控。

值得注意的是,无铅合金元素 Zn 的毒性小,与 Sn 形成的共晶钎料熔点低,是一种具有发展潜力的合金。但由于 Zn 存在较为严重的电化学腐蚀问题,所以一直少有应用。表 3.4 为主要金属元素的标准电动势 (Electromotive Force, EMF)。当钎料金属与焊盘金属之间的标准电动势不同,即存在电位差时,则在焊点局部可构成一个微电池,作为阳极部分的金属离子将向作为阴极的焊盘移动。如果电位差较大,这种移动就会相当迅速,进而造成焊点开裂。Cu 是最为常见的焊盘金属,某些场合会在 Cu 表面镀 Ni、Au、Pd 等来防止 Cu 的氧化。

表 3.4 主要金属元素的标准电动势

金属	标准电动势 (V)	金属	标准电动势 (V)
Au	+1.50	Sn	-0.136
Ag	+0.799	Pb	-0.126
Cu	+0.337	In	-0.342
Ni	-0.250	Zn	-0.763
Pd	+0.987		



由表 3.5 可见, Zn 与这些常见的焊盘金属之间存在最大的电位差, 因此作为阳极的 Zn 将快速地向作为阴极的焊盘金属移动, 其结果就是焊点开裂, 这是使用 Sn-Zn 时最为常见的一种可靠性问题。

表 3.5 电子组装行业常见的金属电位差

钎料金属	微电子封装/印制电路板焊盘常用金属				
	Au	Ag	Cu	Ni	Pd
Sn	1.636	0.935	0.473	-0.114	1.123
Pb	1.626	0.925	0.463	-0.124	1.113
In	1.842	1.141	0.679	0.092	1.329
Zn	2.263	1.562	1.10	0.513	1.75

钎料在生产、存储、焊接过程中一直会与空气接触(当然, 现在也有氮气保护条件下的焊接工艺), 因此钎料氧化是一个不可避免的问题, 且在无铅焊接工艺中更为明显。因此, 有必要了解一下无铅钎料的相关金属元素的氧化趋势及其氧化物的稳定程度, 而最能反映这些问题的就是金属氧化物的标准吉布斯(Gibbs)生成自由能 ΔG_f^0 , 表 3.6 给出了相关金属氧化物的 ΔG_f^0 数据。

表 3.6 一些金属氧化物的标准生成自由能

氧化物	$\Delta G_{f,T}^0$ (kJ/g atom O)			
	298K	400K	500K	600K
Ag ₂ O	-10.5	-3.8	2.5	8.8
CuO	-129.4	-119.7	-111.0	-101.7
Bi ₂ O ₃	-165.7	-156.5	-147.7	-138.3
PbO	-188.8	-178.8	-168.7	-159.5
In ₂ O ₃			-180.5	-171.7
Sb ₂ O ₃	-208.1	-198.9	-189.9	-181.0
SnO ₂	-260.2	-249.7	-239.7	-228.8
ZnO	-318.6	-312.8	-298.5	-288.9

上述性能特点都是在标准钎料合金成分下表现出的, 如果钎料合金成分受到污染, 则对钎料性能的影响很大。表 3.7 描述了钎料中相关金属元素对钎料性能的影响, 这就要求在质量控制过程中对环境及操作规范进行严格控制, 以防材料被污染。

表 3.7 相关金属元素对钎料性能的影响

元素	符号	对钎料性能的影响
铜	Cu	多数来源于焊接过程, 使钎料熔点升高, 也提高钎料的结合强度。含铜量在 1%以内时, 会增加钎料的蠕变阻力。钎料中含有 1%~2% Cu 时, 可抵制钎料对铜烙铁头的腐蚀作用, 并用于焊接细线
锌	Zn	含量达 0.001%, 其影响就会表现出来; 若含量达到 0.01%, 就会对焊点的外观、钎料的流动性和润湿性造成不良影响。它是钎料中最忌讳的金属之一
铝	Al	对钎料的流动性和润湿性有害, 不但影响外观和焊接操作, 而且易发生氧化和腐蚀, 要求其含量低于 0.001%



续表

元素	符号	对钎料性能的影响
镉	Cd	有降低熔点的作用，并能使钎料晶粒变得粗大而失去光泽；含量超过 0.001%，就会使流动性降低，焊点也会变脆
砷	As	即使含量很少，也会影响焊点外观，增加硬度、脆性，但可略提高流动性
锑	Sb	可增大钎料的机械强度和电阻。其含量在 0.3%~3%时，焊点形成很好；含量在 6%以内能使焊点的强度增加。因锑可使钎料的蠕变阻力增加，所以高温钎料总要加锑。但含量在 6%以上时，钎料变得脆而硬（生成 SbSn），流动性和润湿性也变差，抗腐蚀性减弱
硫	S	含量高于 0.0005%时，就会影响焊接，因为它常以腐蚀性沉淀物的形式残留在基体金属表面

3.2 助焊剂概述及其工艺性要求

助焊剂是电子组装技术中不可缺少的材料，它通过物理与化学作用影响钎焊过程，最终形成可靠的焊点。在钎焊过程中，熔融钎料与基体金属的润湿可以说主要取决于助焊剂的作用，钎焊接头的强度和抗腐蚀性则主要取决于钎料及它与基体金属的作用和关系。钎料与基体金属的润湿能力与钎料的本性固然有相当大的关系，但与助焊剂的作用相比则次要得多。波峰焊工艺中的助焊剂与钎料合金分开使用，而再流焊工艺中的助焊剂则作为钎料膏的重要组成部分与钎料合金一起使用。

3.2.1 助焊剂概述

助焊剂在电子组装软钎焊过程中的主要作用为：去除钎焊区材料的表面氧化物，为液态钎料在基体金属上铺展润湿创造必要条件；形成液态薄层覆盖基体金属和钎料表面，隔绝空气而起保护作用，防止钎料合金再氧化；起界面活性作用，降低液态钎料的表面张力，改善液态钎料对基体金属的润湿，增强焊点的传热能力；辅助热传导，将热量传递到钎焊区。

1. 助焊剂的组成

软钎焊技术中，助焊剂的存在形式包括剂状、膏状及固体状，其主要成分如表 3.8 所示，主要包括成膜剂、活性剂、溶剂和添加剂等。

表 3.8 助焊剂的主要组成

助焊剂组成		典型原材料
成膜剂	天然树脂	松香
	合成树脂	改性酚醛树脂、改性丙稀树脂、改性松香、改性环氧树脂、聚氨基甲酸酯、聚乙烯树脂、聚乙二醇和硬脂酸酚等
	矿脂	矿物油、凡士林、纤维素、石脂等
活性剂	无机酸	盐酸、正磷酸、氢氟酸、氟硼酸等
	无机金属盐	ZnCl ₂ 、SnCl ₂ 、CdCl ₂ 、PbCl ₂ 、NaCl、氟硼酸镉、氟硼酸锌等
	有机酸	乳酸、硬脂酸、柠檬酸、松香酸、苯二甲酸、水杨酸、谷氨酸、油酸、安息香酸、草酸、十二烷酸等



续表

助焊剂组成		典型原材料
活性剂	有机卤化物	溴化水杨酸、溴化胍、盐酸联胺、盐酸苯胺、盐酸二乙胺、盐酸谷氨酸、氢溴酸胍、盐酸胍、十六烷基溴化吡啶、溴化胺、十六烷三甲基溴化胺、二乙基二甲基十六烷溴化胺等
	胺、酰胺等	乙二胺、三乙醇胺、苯胺、联胺、磷酸苯胺、磷酸联胺、环乙烷二胺、环丁烷二胺、二乙烯胍、二乙烯三胺、甘油、氟碳等
添加剂		乳剂、甘油、润湿剂等
溶剂及稀释剂		水、乙醇、丙三醇、甲醇、异丙醇、聚乙二醇、乙醚、松节油

(1) 成膜剂

常用成膜物质有天然树脂、合成树脂和部分有机化合物，加入量一般为 10wt%~20wt%，有时高达 40wt%，过多会影响扩展率，使助焊剂的性能下降。加入成膜物质后，助焊剂能形成一层致密的有机膜，防止焊接过程中的熔融合金进一步氧化。

在免清洗助焊剂中，成膜物质还会形成机械、化学性质稳定的有机膜，对焊点和基板等焊接部位起到一定的保护作用，具有防腐蚀性和优良的电气绝缘性。在普通家电或要求不高的电器装联中，焊后可不必清洗，以降低成本；而在精密电子装联中，即使免清洗焊接也要焊后清洗。

(2) 活性剂

活性剂是为了提高助焊剂性能而加入的活性物质，加入量一般为 2wt%~10wt%，主要起到去除氧化物的作用，同时还可降低合金的表面张力。活性剂的活性是指与表面氧化物等起化学反应的能力，它反映了清洁金属表面和增强润湿性的能力。一般活性剂的作用机理是：在加热时释放出 HCl，微量的 HCl 将钎料及被焊金属表面的氧化物转化为可溶于水的氯化物，使其与清洁的金属表面分离开来。表 3.9 为活性剂的一般性质，包括分子量、活性温度及溶解度等。

表 3.9 活性剂的一般性质

变量	性质变化		
活性剂分子量	活性剂强度	活性剂活性温度	活性剂对水溶解度
小→大	强→弱	低→高	易→难

活性剂一般分为无机活性剂和有机活性剂两种，无机活性剂助焊性好，但作用时间长，腐蚀性大，不宜在电子装联中使用；有机活性剂活性柔和、作用时间短、腐蚀性小、电气绝缘性好，适宜用于电子装联中。当活性剂为盐酸二乙胺、三乙胺时，加入量常为 1wt%~5wt%。如果活性剂中含有氯化物，氯离子通常在 0.1wt%~1wt%之间（根据 MIL-F-14265 规定，氯含量应控制在 0.2wt%以下），随着其浓度的提高，助焊剂的活性也在提高，润湿速率迅速增大。但是当氯含量大于 1wt%后作用就不再明显，反而会造成铜层的腐蚀，这说明活性剂用量的增加在改善可焊性的同时，也会导致焊后表面绝缘电阻降低，产生不应有的腐蚀性。



(3) 溶剂

溶剂要与成膜剂、活性剂兼容，不应是吸湿性的，并且应该是高闪点、全挥发性物质，但不能是高挥发性物质。例如，在钎料膏中应用时，干燥前应尽量保持，干燥后全部挥发掉，以免再流焊接时残留的溶剂沸腾，造成空洞和焊球。溶剂加入量一般为 1wt%~7wt%，应具备：对助焊剂中的各种固体成分均具有良好的溶解性；常温下挥发程度适中，在焊接温度下迅速挥发；气味小、毒性小等特点。

常见的溶剂有醇类和醚类，其中在水洗型钎料膏中多元醇应用最为广泛，如乙醇（78.1℃）和异丙醇（IPA 82.5℃）等，因为它的羟基特别多，完全挥发的温度高，焊接时有强的还原性，能减小表面张力促进润湿。而在松香型钎料膏中，醚类应用最为广泛，它具有较高的熔点并且对松香的溶解能力强。

(4) 添加剂

添加剂是为适应工艺和环境而加入的具有特殊物理和化学性能的物质。常用添加剂有 pH 调节剂、消光剂、缓蚀剂、光亮剂、阻燃剂、润湿剂和发泡剂等。

2. 助焊剂的分类

助焊剂分类的方法很多，通常按照活性、腐蚀性、基材和清洗方式来划分。助焊剂按腐蚀性划分可分为高腐蚀性的（无机酸）、腐蚀性的（有机酸）、中等腐蚀性的（基于天然松香）和非腐蚀性的（免洗或低残留物助焊剂）四种；按基材划分可分为酸系助焊剂和树脂系助焊剂，再细分可分为无机酸（Inorganic）、有机酸（Organic）、天然松香（Rosin）与人造松香（Resin），见表 3.10；按清洗方式可分为有机溶剂清洗型、水清洗型和免清洗型。

表 3.10 助焊剂的总分类

酸系	无机酸 (IN)	无机酸	说明：RMA 以波峰焊和再流焊方式大量使用在商业电子中；RA 广泛用于工业和消费类电子产品的制造，在适当的工艺配合下可常留在组件上不清洗；SRA 普遍被用于双波峰焊接中，除含有少量天然松香外，还含有合成树脂，其活性随活化剂等级变化，属于合成型松香系助焊剂，残留物较软，在室温下呈液态，比松香助焊剂更易去除
		无机盐	
	有机酸 (OA)	有机酸（羧酸、谷氨酸等）	
		有机卤素（氯化胺、苯胺）	
树脂系	天然松香 (RO)	无活性（纯）松香（R）	
		中等活性松香（RMA）	
		完全活性松香（RA）	
		超活性松香（SRA）	
	人造松香/合成树脂（RE）		

J-STD-004 描述了每个分类中三种助焊剂的活性或腐蚀性水平：L（低）、M（中）、H（高）。每一个次分类中进一步的分级由数字 0 和 1 表示，0 表示不含卤素，而 1 在低活性助焊剂中表示卤素含量小于 0.5%，在中等活性助焊剂中表示卤素含量介于 0.5%~2.0%之间，在高活性助焊剂中表示卤素含量大于 2.0%。表 3.11 为 J-STD-004 基于材料成分和卤化物含量的助焊剂分类。



表 3.11 J-STD-004 基于材料成分和卤化物含量的助焊剂分类

树脂系		酸系	
#	助焊剂种类	#	助焊剂种类
天然松香 (RO)		有机酸 (OA/WS)	
A	Rosin RO Low (0%) L0	M	Organic OA Low (0%) L0
B	Rosin RO Low (<0.5%) L1	N	Organic OA Low (<0.5%) L1
C	Rosin RO Moderate (0%) M0	P	Organic OA Moderate (0%) M0
D	Rosin RO Moderate (0.5%~2.0%) M1	Q	Organic OA Moderate (0.5~2.0%) M1
E	Rosin RO High (0%) H0	R	Organic OA High (0%) H0
F	Rosin RO High (>2.0%) H1	S	Organic OA High (>2.0%) H1
人造树脂 (RE)		无机酸 (IA/WS)	
G	Rosin RE Low (0%) L0	T	Inorganic IN Low (0%) L0
H	Rosin RE Low (<0.5%) L1	U	Inorganic IN Low (<0.5%) L1
I	Rosin RE Moderate (0%) M0	V	Inorganic IN Moderate (0%) M0
J	Rosin RE Moderate (0.5~2.0%) M1	W	Inorganic IN Moderate (0.5~2.0%) M1
K	Rosin RE High (0%) H0	X	Inorganic IN High (0%) H0
L	Rosin RE High (>2.0%) H1	Y	Inorganic IN High (>2.0%) H1
注: L0, L1 无腐蚀, 可清洗也可不清洗; M0, M1 轻微腐蚀, 可清洗也可不清洗; H0, H1 较重腐蚀, 需清洗			

3. 新型免清洗助焊剂 (LR/NC)

新型免清洗助焊剂主要包括免清洗低固态助焊剂和免清洗无残留助焊剂两大类。免清洗低固态助焊剂含有松香或树脂, 一般固体含量在 8%~10%或以下, 多数含少量卤素 (0.2%以下), 也有的不含卤素, 焊接性能基本可达到普通松香型的效果, 焊后板面较为清洁, 可清洗也可不清洗。免清洗无残留助焊剂是近年来的一个发展方向, 包含醇基免清洗无残留助焊剂和水基免清洗无残留助焊剂。醇基免清洗无残留助焊剂一般由合成树脂和性能更加稳定的活性剂组成, 一般固体含量在 5%~10%或以下, 不含卤素 (<0.01%~0.03%), 扩展率不小于 80%。随着技术的发展, 其固体含量可控制在 2%~5%, 甚至更少, 表面电阻不小于 $10^8\Omega$, 典型值为 $7.5 \times 10^{10} \sim 9.9 \times 10^{10}\Omega$, 已达到免清洗助焊剂的要求。但这类助焊剂对焊接温度特别敏感, 在高温下易发生分解, 产生大量烟雾和凝结物, 并且残留物易于发生聚合变硬, 阻碍探针测试。水基免清洗无残留助焊剂对环境友好, 热承受能力和活化剂等化学物质在水中的反应活性比在醇中高, 且在改善残留物和提高可焊性方面比醇基助焊剂更有优势, 但成本较高。

3.2.2 助焊剂的选择与使用

1. 助焊剂性能的基本要求

- ① 常温下储存稳定、刺鼻味小, 焊后不粘手、快干性佳, 环境友好, 对人体无害。
- ② 具有去除表面氧化物、降低表面张力和防止再氧化等特性。同时, 润湿扩散速度比溶化钎料要快, 通常要求扩展率在 90%左右或以上。
- ③ 满足发泡、喷雾等不同涂覆方式, 焊后具备良好的清洗性, 残渣易于去除且具有不



腐蚀、不吸湿、不导电及表面阻抗良好的特性。

④ 活化温度范围覆盖钎焊温度，且熔点和最低活性温度比钎料熔点低；在钎焊温度范围内，助焊剂黏度小、流动性好，有利于其产物排除，避免形成夹杂；助焊剂及其产物的密度应小于液态钎料密度，否则助焊剂就不能覆盖钎料表面。

⑤ 焊接时具有良好的热稳定性，不易产生焊球或析出有害气体，且助焊剂及其残渣不对基体金属和焊点有强烈的腐蚀作用。

免清洗无残留助焊剂除了满足助焊剂的基本性能要求外，通常希望还具有以下特点：焊后无残余物，PCB 表面干净不粘手；固体含量极少，不含卤化物，易挥发物含量极少；焊后 PCB 表面绝缘电阻高 ($>10^{11}\Omega$)；能够进行良好的探针测试；操作工艺简便易行，烟雾气味小。

2. 助焊剂性能的评估内容

助焊剂性能的评估内容可以从以下几个方面考虑：外观、物理稳定性、比重、可焊性、固态含量、卤素含量、水萃取液电阻率、腐蚀性、酸值、表面绝缘阻抗及离子污染度等。

① 外观：助焊剂外观首先必须均匀，液态助焊剂还需要透明或呈乳状。一般目测检验其是否透明，是否有沉淀、分层和异物。

② 物理稳定性：一般包括密度、黏度、闪点、气味及色泽等在 $5\sim 45^{\circ}\text{C}$ 的温度环境下保持稳定。

③ 比重：工艺选择与控制的主要参数，可用比重计进行测试，同时要测试助焊剂的温度（有机溶剂比重会随温度变化，升温 1°C 比重下降 0.001）。

④ 可焊性：关键指标，表示助焊效果，以扩展率来表示，一般控制在 $80\%\sim 92\%$ 。

⑤ 固体含量：在 110°C 时加热，剩余的不挥发物的百分比，表示焊剂中的非溶剂部分，它与焊接后的残留量有一定的对应关系。

⑥ 卤素含量：该指标以离子氯的含量来表示离子性的氯、溴、碘的总和。

⑦ 水萃取液电阻率：该指标反映的是焊剂中导电离子的含量水平，其值越小，离子含量越多。随着助焊剂向低固态含量免清洗方向发展，最新的 ANSI/J-STD-004 标准已经放弃该指标。

⑧ 腐蚀性：助焊剂由于其可焊性的要求，必然会给 PCB 或焊点带来一定的腐蚀性。铜板腐蚀测试反映的是焊后残留物的腐蚀性大小，其环境测试时间为 10 天（一般为 $7\sim 10$ 天）。

⑨ 酸值：中和一克样品所需要的 KOH 的毫克数。

⑩ 表面绝缘阻抗：GB 或 JIS 要求表面绝缘电阻 (SIR) 值最低不能小于 $10^{10}\Omega$ ，J-STD-004 要求 SIR 值最低不能小于 $10^8\Omega$ 。由于试验方法不同，这两个要求的数值间没有可比性。

实际使用的助焊剂并不总能全面满足上述性能要求，特别是在去膜能力和腐蚀作用两种性能之间往往出现矛盾，生产中通常在满足去膜能力的要求下依靠工艺措施来防止其腐蚀作用。

免清洗助焊剂的性能评估除包含上述内容外，还应从润湿能力、涂覆工艺（喷雾涂覆）、预热工序（窄的工艺窗口）、工艺参数及焊接气氛几个方面进行调整与控制。值得注意的是，免清洗助焊剂并不是不能清洗，也不是完全不必要清洗，更不是完全没有焊后残留物，只是相对来讲残留较少罢了，是否需要清洗要视被焊接产品本身的要求而定。在精密电子装联工

艺中或要求 100% 的良品保证时，如军工、航天或医用电子产品，任何极其微量的残留都有可能

3. 助焊剂的选择标准

J-STD-001E 标准根据主要功能或性能的要求将电子产品分成三大类：第一类为通用电子产品，主要是普通的消费类电子产品，如收录机、收音机等；第二类为所谓的专门、耐用消费类电子产品，包括对性能与寿命均有一定要求但并非十分严格的产品，这类产品要求在典型的使用环境条件下不能出现早期失效情况，如计算机、通信产品与一些汽车电子产品等；第三类则是高性能要求的电子产品，包括那些需连续高性能和在恶劣的环境条件下使用，但在寿命期内又不能出现失效现象的电子产品，如军事用途产品、航空航天电子产品及用于救生系统的电子产品等。

J-STD-001E 规定了第三类电子产品的焊接装配线只能选用 ROLO, ROL1, REL0, REL1 及 OAL0 类型的焊剂，OAL1 类型的焊剂不能用于免清洗焊接工艺的要求。因此，只有选定焊剂类型后，各项指标的要求才能具体化和便于操作。罗道军等人推荐依据表 3.12 来选择助焊剂产品。如果采取必要的措施后能保证满足焊接和产品质量的要求，也可做出其他选择，如第二类产品也可使用水溶性的 H0 焊剂，只要能保证焊接和清洗后无相关的质量问题即可。

表 3.12 可供选择的助焊剂类型

电子产品类别	焊后的清洗工艺中可用的焊剂类型			焊后的免清洗工艺中可用的焊剂类型		
	RO	RE	OA	RO	RE	OA
1	L0,L1,M0,M1,H0,H1			L0,L1,M0,M1	L0,L1,M0,M1	L0, M0
2	L0,L1,M0,M1			L0,L1,M0	L0,L1,M0	L0,M0
3	L0, L1			L0,L1	L0,L1	L0

3.3 钎料膏概述及其工艺性要求

3.3.1 钎料膏概述

对于钎料合金的形态分类，目前在工业应用中常用钎料合金名称的首个字母来区分，如表 3.13 所示。钎料膏是 SMT 工艺中应用最广泛的连接材料。它是由钎料合金粉末与助焊剂按照一定比例均匀混合而成的膏状体。钎料膏的一个重要特性是其黏度具有流变特性，即在剪切力作用下黏度减小以利于印刷，而印刷之后黏度恢复，从而在再流焊之前起到固定电子元器件的作用。

表 3.13 钎料合金形态

表示符号	F	P	B	D	R	S	W
合金形状	熔化状	膏状	条/棒状	粉末状	带状	丝、线状	特殊状



钎料膏根据钎料合金种类可分为有铅钎料膏与无铅钎料膏,根据清洗方式可分为松香基钎料膏、水溶性钎料膏与免清洗钎料膏,根据涂覆方式可分为模板印刷用、丝网印刷用与滴注用钎料膏。

钎料膏所用合金粉末主要有 3 个性能参数,即粒度/粉末颗粒直径、球形度和含氧量。表 3.14 给出了 J-STD-005 标准中定义的 6 种钎料合金粉末粒度,其中类型 3 和类型 4 是最为常用的。此外,尽管 J-STD-005 中规定钎料合金粉末的球形度应满足于颗粒长宽比 <1.07 ,但实际上绝大多数合金粉末供应商无法满足这一要求,目前工业界比较接受的是粉末颗粒长宽比应小于 1.5。虽然在含氧量方面没有相关标准规定,但工业界一般接受的是含氧量应小于 150ppm。

表 3.14 钎料合金粉末的粒度分布 (单位:微米)

类型	不大于	只有小于 1%的部分大于	最少有 80%位于其中	最多有 10%的部分小于
1	160	150	150~75	20
2	80	75	75~45	20
3	50	45	45~25	20
类型	不大于	只有小于 1%的部分大于	最少有 90%位于其中	最多有 10%的部分小于
4	40	38	38~20	20
5	30	25	25~15	15
6	20	15	15~5	5

钎料膏所用膏状助焊剂与传统剂状助焊剂类似,但由于使用工艺条件不同,所以配方也不同。膏状助焊剂在钎料膏中的体积约为 50%,而质量比约为 10%。而在膏状助焊剂中,松香/树脂类约占 60%,溶剂约占 30%,活性剂约占 3%,其他添加剂综合约占 7%,如图 3.12 所示。

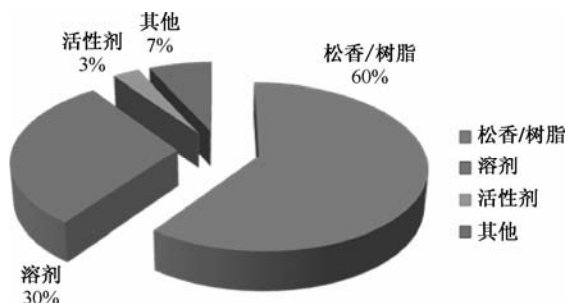


图 3.12 钎料膏中的助焊剂组成及比例

3.3.2 钎料膏的选择与使用

选择使用钎料膏时必须对其性能进行系统评估,内容主要包括钎料膏的基本组成(合金成分、锡粉颗粒外形、锡粉颗粒大小及分布、金属含量、助焊剂含量)、钎料膏的印刷性及黏附性(黏度、流变性、塌陷性、附着力)、钎料膏的再流焊性(润湿性、锡球测试、空洞



测试)及焊后可靠性[固体含量、酸值(滴定法)、卤化物含量(滴定法)、氯和溴含量(铬酸银试纸)、腐蚀性、铜镜测试、水析电阻]等。测试方法及标准可参考 J-STD-004、J-STD-006、IPC-TM-650。在实际应用过程中,钎料膏的基本组成一般由供应商提供,而钎料膏的印刷性及再流焊性一般为选型人员必测项,焊后可靠性既可为选型人员测试项目,也可由供应商提供。

钎料膏是所有钎料产品中最“娇气”的,其保存和使用都必须遵守一定的规则:

- ① 钎料膏要放在冰箱内在 $3\sim 10^{\circ}\text{C}$ 条件下进行冷藏保存,绝对不可以进行冷冻保存;在运输过程中也要将干冰或冰袋等放入包装箱内;
- ② 出库原则必须遵循先进先出的原则,切勿造成钎料膏在冷柜存放时间过长;
- ③ 当钎料膏从冰箱中取出准备投入印刷工序之前,先不能开封,而是要在室温下放置至少 4 小时回温;
- ④ 回温开封后,要先对钎料膏进行搅拌以保证钎料膏中的各组成成分均匀分布,而且搅拌要沿着同一方向,手工搅拌一般为 $3\sim 5$ 分钟,采用专用搅拌设备则 $1\sim 3$ 分钟即可;
- ⑤ 使用时建议车间温度为 $23\pm 5^{\circ}\text{C}$,相对湿度在 $45\%\sim 65\%\text{RH}$ 范围内;
- ⑥ 开盖后的钎料膏建议在 12 小时内使用完毕,如果未使用完毕,必须将其用干净的空罐装好,然后再密封放回冷柜保存;
- ⑦ 添加钎料膏量时,第一次放在钢网上的钎料膏量以印刷滚动时不要超过刮刀高度的 $1/2$ 为宜,做到勤观察、勤加次数、少加量,多次少量;
- ⑧ 印刷作业需暂停超过 40 分钟时,最好把钢网上的钎料膏收在瓶子里,以免变干造成浪费;
- ⑨ 贴片后的 PCB 要尽快过再流焊炉,最长时间不要超过 12 小时。

3.4 其他钎料形态概述

3.4.1 钎料丝

钎料丝一般为药芯焊丝,是将助焊剂预先密封在钎料合金坯料的内部,经过拉拔而制成的,中心为助焊剂芯,外边包裹有软钎料合金的丝材。按照不同的钎料合金与不同性能的助焊剂组合,可以有很多规格的药芯焊丝。钎料丝按照钎料合金的不同可分为锡铅软钎焊丝和无铅软钎焊丝,而按照助焊剂类型的不同,大体上可分为树脂芯软钎焊丝(多为 R 型、RMA 型和 RA 型)、水溶性树脂芯软钎焊丝和免清洗助焊剂芯软钎焊丝。

钎料丝一般用于手工焊接、补焊及维修,丝直径常见为 0.3mm 、 0.5mm 、 0.8mm 、 1.0mm 、 1.2mm 、 1.6mm ,助焊剂含量一般为 $0.1\%\sim 3.5\%$,推荐为 $2\text{wt}\%\sim 3\text{wt}\%$,常见灌注方式有 1 芯、3 芯和 5 芯等。值得注意的是,钎料丝直径不同,其实际加工过程中的允许偏差也不同(见表 3.15)。



表 3.15 常见钎料丝外形尺寸及偏差

直径 ϕ (mm)	允许偏差 (mm)
$\phi \leq 0.3$	± 0.02
$0.3 < \phi \leq 0.8$	± 0.03
$0.8 < \phi \leq 2.5$	± 0.05
$2.5 < \phi \leq 6.0$	± 0.10

3.4.2 预成型焊片

在电子制造工艺中,PCB 上总有一些焊点位置因设计或组装工艺的限制出现钎料量释放不足,导致焊后焊点不饱满,预成型焊片的出现很好地解决了此问题。预成型焊片是将合金材料经机械加工制成特定形状(圆形、长方形、正方形、圆环、长方形框、正方形框、带柄圆环等)的软钎料产品,用于各种元器件、电子设备、金属材料、表面贴装(SMT)等产品的焊接。由于它可根据用户需要制成各种尺寸规格,使得用户在设计产品时变得更加灵活。同时,其良好的尺寸精度,使得焊点的一致性得以保证。图 3.13 为常见预成型焊片及其标准化编带,具有易存储、使用方便、能有效提高产品焊接工艺一致性、提高生产效率的特点。预成型焊片的技术要点包括两个方面:一是在预制成型的钎料片表面使用浸润工艺附着一层厚薄均匀的助焊剂层;二是将金属钎料与助焊剂均匀混合,再预制成具有一定形状的预成型钎料片。从使用便捷性上来看,后者将逐渐成为主流。

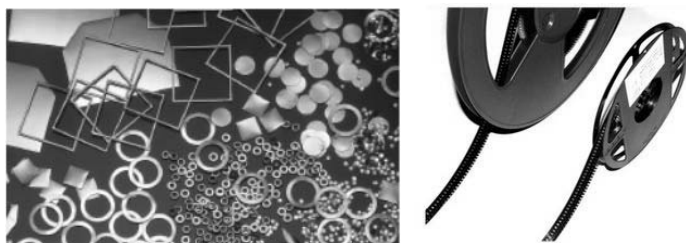
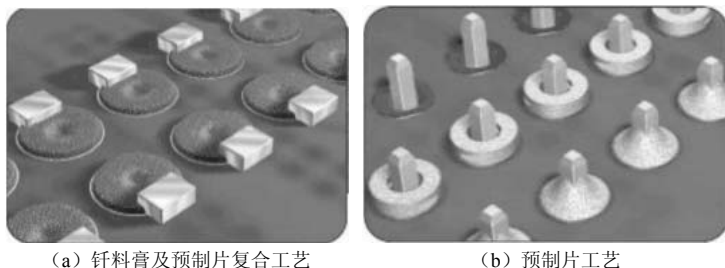


图 3.13 预成型焊片及其标准化编带

预成型焊片应用工艺常见有两种,即钎料膏与预制片复合工艺和纯预制片工艺(见图 3.14),实现定量补充钎料。此工艺既解决了焊点不饱满的问题,提高了可靠性,又省掉了后续人工加锡,实现了生产自动化,为企业节约了人工成本。



(a) 钎料膏及预制片复合工艺

(b) 预制片工艺

图 3.14 预制片应用工艺



3.5 无铅化兼容性问题

无铅化电子装联是指组装用钎料合金、元器件表面镀层和 PCB 表面保护层等全部均为无铅化。这必然带来一个重要问题：传统工艺中三者所用的均为 SnPb 钎料，因此不存在兼容性的问题，但转为无铅制程之后，这三种材料可能是完全不同的，它们相互之间的兼容性就是一个问题。

3.5.1 无铅化PCB焊盘表面镀层工艺要求

PCB 是由一定厚度的铜箔导线(导电条)牢固地附着在绝缘材料板上而构成的电路基板，起着搭载元器件并使之电气互连的作用。PCB 是电子装联组件的重要组成部分，对组件的可靠性起着重要的作用。

无铅化组装对 PCB 热性能(耐热性、热稳定性、热膨胀系数、热导率)、剥离强度、翘曲度、抗弯强度、可焊性及耐浸焊性都提出了一定的要求。对于 PCB 表面防止铜导线和铜焊盘等氧化的可焊性防护镀层，在传统的 PCB 制作工艺中，SnPb 钎料的热风整平(Hot Air Solder Leveling, HASL)被广泛应用。随着无铅化电子组装进程不断发展，各种环保型、无铅化的 PCB 表面防护层不断出现于研究报告和实际产品之中，如表 3.16 所示，目前主流为 OSP、I-Ag、I-Sn 和 ENIG。表 3.17 对比了这 4 种保护层的物理性能。

表 3.16 各种无铅化 PCB 表面保护层

防护层种类	材料及工艺
OSP (Organic Solderability Preservative) 有机物可焊性保护层	苯并三氮唑 (Benzotriazole, BTA)
	烷基咪唑 (Alkylimidazoles)
	苯并咪唑 (Benzimidazoles, BAs)
	预涂助焊剂 (Preflux)
Ni-Au	电解电镀 Ni-Au (EG)
	化学镀 Ni/浸 Au (ENIG)
	化学镀 Ni/化学镀 Au (自身催化)
	化学镀 Ni/化学镀 Au (基板催化)
Ag	化学镀 Ag 或浸银或微电流电镀银
Bi	浸 Bi
Pd/Au	电解电镀 Pd 或 Pd 合金
	自身催化化学镀 Pd
	自身催化化学镀 Pd/浸 Au
Ni-Pd/Au	化学镀 Ni/浸 Pd
	化学镀 Ni/自身催化化学镀 Pd
	化学镀 Ni/自身催化化学镀 Pd/浸金
Sn	电解电镀 Sn
	浸 Sn
	浸 Sn+自身催化化学镀 Sn



续表

防护层种类	材料及工艺
Ni-Sn	电解电镀 Ni/电解电镀 Sn
Sn-Ag	电解电镀 Sn-Ag
Sn-Bi	电解电镀 Sn-Bi
	浸 Sn-Bi
Sn-Cu	电解电镀 Sn-Cu
Sn-Ni	电解电镀 Sn-Ni

表 3.17 4 种无铅化 PCB 表面保护层的物理性能对比

物理性能	Sn-Pb HASL	浸 Ag	浸 Sn	OSP	ENIG
保存寿命(月)	6	6	6	3	6
可经历回流次数	4	5	5	4	4
成本	中等	中等	中等	低	高
工艺复杂程度	高	中等	中等	低	高
工艺温度(℃)	240	50	70	40	80
厚度范围(μm)	1~25	0.05~0.20	0.8~1.2	0.2~0.5	0.05~0.20Au 3~5Ni
助焊剂兼容性	好	好	好	一般	好

注：根据具体工艺参数不同，上述评价可能略有偏差。

1. 有机可焊性保护层(OSP)

OSP 的基本原理是利用唑类有机物与氧化铜之间产生化学反应生成聚合物保护层,也是目前得到了最广泛应用的一种无铅化表面保护层方法。

(1) OSP 工艺的优点

- ① 焊盘表面的平整度很高,利于得到均匀一致的钎料膏印刷效果;同时,有利于减少在 HASL 工艺中常见的桥连缺陷。
- ② 在波峰焊和再流焊应用中均表现出良好的可焊性。
- ③ 润湿直接发生于钎料与 Cu 焊盘之间,Sn 与 Cu 之间易于生成金属间化合物的特点保证了良好焊点的形成。
- ④ 可以承受 4 次回流温度循环。
- ⑤ 返修容易。
- ⑥ 供应商的选择不会受到限制,因为大多数 PCB 制造商有能力采用 OSP 工艺。

(2) OSP 工艺的主要不足

- ① 日常操作要特别小心,不能让手直接接触到 OSP 保护层,因为人体汗液中的盐分会损害 OSP 保护层并导致可焊性变差。
- ② 对钎料膏印刷要求很高,不能出现印刷错误,因为清洗会破坏 OSP 保护层,如醇类有机溶剂可以溶解 75%左右的 OSP,即使是水也可以溶解 15%左右。
- ③ OSP 保护层会给 ICT 测试带来困难,可能需要较为昂贵的多点探针,且探针的清洗



也会比较频繁。

④ 在包装和运输方面,每块带有 OSP 保护层的 PCB 之间要使用隔离纸以防止相互之间的摩擦破坏 OSP 表面。

2. 化学浸银 (I-Ag)

由于 Ag 比 Cu 具有更高的标准电动势,因此浸 Ag 实际上是一种基于电化置换反应的过程:



浸 Ag 工艺的未来应用前景是比较光明的。成本相对较低、工艺易于实现且稳定性良好都是它的优点。目前,通过在溶液中添加一些特殊物质已克服了其表面容易失去光泽的问题。但浸 Ag 工艺还是有需要进一步改善的地方,如对通孔和盲孔的覆盖率提高,而且在某些工艺实践中发现浸 Ag 表面容易在空洞缺陷等。

3. 化学浸锡 (I-Sn)

在浸 Sn 工艺中,由于 Sn 与 Cu 之间存在的是负电位差,所以单纯地将 Cu 板浸在液态 Sn 中不会形成 Sn 的沉积。如果增加溶液中 Sn 离子的浓度,同时将 Cu 离子浓度控制到接近于零,则可能逆转电位差,从而使 Sn 可以在 Cu 表面沉积:



因此,浸 Sn 工艺中使用的溶液首先是含有硫脲($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$)和/或氰化物等成分,它们与 Cu 离子之间有强烈的络合作用,从而可以将溶液中的 Cu 离子浓度控制到接近于零。另外,浸 Sn 沉积槽内的溶液主体不是单纯的 Sn,而是硫酸锡或氯化锡溶液,从而可以大大增加 Sn 离子的浓度。

浸 Sn 工艺在早期很被看好,但是其未来的应用前景并不明确,主要存在的问题有:

- ① 浸 Sn 工艺中用到的硫脲可能是一种致癌物质,这就违背了环保的初衷;
- ② 浸 Sn 表面一直被认为易于生长锡须,从而带来了长期可靠性问题;
- ③ Sn 与 Cu 之间在常温下也会有金属间化合物的不断生长,必然会降低表面可焊性和印制电路板的存储寿命;
- ④ 在成本上不具有优势,几乎与 ENIG 相同。

4. 化学镍金 (ENIG)

ENIG 工艺目前已得到了大量应用,它由化学镀镍工艺和化学浸金工艺组成,具备如下优点:

- ① 表面平整度好,有利于后续的钎料膏印刷和焊接,特别是对于越来越小的焊盘尺寸来说,这一优点更为重要;
- ② 表面可焊性好,接触电阻佳,因为 Au 不易氧化且不易被腐蚀;
- ③ 在高温下也不易氧化,适用于大功率器件的散热通道。

ENIG 工艺是一种具备很多优点的 PCB 表面保护层形成方法,但是也存在重要的缺陷问题,即“黑盘”和“金脆”问题。前者表现在经过 ENIG 表面处理的焊盘会偶发性地出现可



焊性不良, 并导致随后形成的焊点强度不够, 甚至出现焊点开裂, 可观察到焊盘表面呈深灰色或黑色, 而且有明显的润湿不良迹象。后者表现为经过 ENIG 表面处理的焊盘, 焊后表面的金会溶解到焊料中并形成金属间化合物。由于这些含金化合物颗粒非常脆, 焊点也表现出一定的脆性, 所以业界称其为“金脆”现象。

3.5.2 无铅化元器件焊端/引脚表面镀层工艺要求

元器件是电子、电器系统的基础部件, 与 PCB 类似, 对组件的可靠性同样起着重要的作用。无铅化组装对元器件表面镀层材料、耐热性、耐湿性和共面度提出了更高的要求。表面镀层的主要作用是提高可焊性; 耐热性决定了焊接过程中最高能承受的温度, 影响工艺窗口; 耐湿性表现为元器件对湿气的敏感度等级, 用以指导存储和使用过程中对湿气的控制, 防止出现“爆米花”效应等不良; 共面度主要受钎料膏印刷工艺要求限制, 以防出现元件引脚/焊端与钎料膏接触不良, 虚焊、枕头效应等焊接不良, 一般要求小于 0.1mm。

在无铅化电子组装中, 元器件的可焊性相对较差, 焊端爬锡高度相对较小, 焊点发暗、发灰, 甚至有点粗糙, 如图 3.15 所示。由于钎料成分的变化及焊点灰度上的差异, 使得 AXI 和 AOI 测试设备需要对某些参数进行调整。

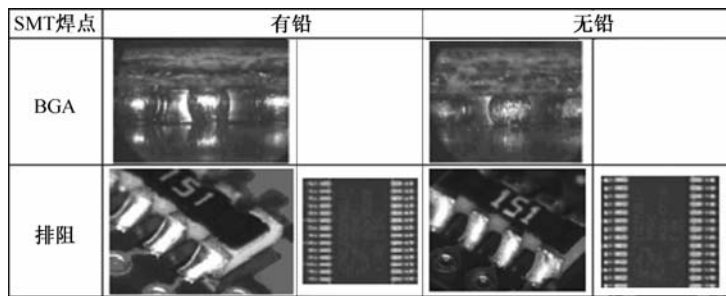


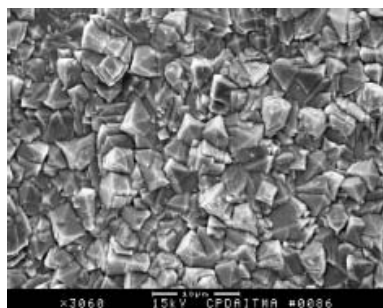
图 3.15 有铅与无铅焊点外观对比

元器件引脚/焊端表面镀层在传统工艺中大多采用电镀或浸镀方法形成以 SnPb 钎料为主体的表面镀层。在转向无铅化制程时, 纯 Sn、SnCu 合金、SnAg 合金、SnBi 合金等都成为不同公司的选择。例如, 美国 Intel 公司选择纯 Sn 作为引线框架的表面镀层(同时选择 OSP 和浸 Ag 作为 PCB 表面保护层, 选择 Sn0.7Cu 作为波峰焊用无铅钎料, 选择 Sn4.0Ag0.5Cu 作为再流焊用无铅钎料), 美国 Boeing 公司选择热浸 Sn0.7Cu 合金作为元器件表面镀层(同时选择 OSP、ENIG 和浸 Ag 作为 PCB 表面保护层, 选择 Sn0.7Cu 作为波峰焊用无铅钎料, 选择 Sn3.8Ag0.7Cu 作为再流焊用无铅钎料), 而日本 Seiko-Epson 公司选择热浸 SnBi 合金作为元器件的表面镀层, 这 3 类也是最为广泛使用的 3 种。图 3.16 所示为纯 Sn、SnCu 和 SnBi 表面镀层形貌, 三者的平均晶粒尺寸均在 5 μ m 左右。

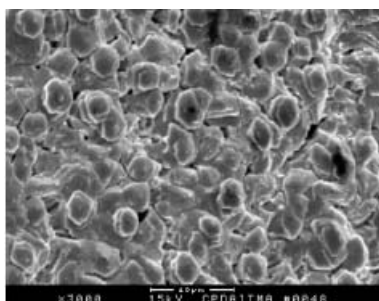
如果选择无铅钎料作为元器件的表面镀层, 则目前纯 Sn 和 SnCu 钎料应用较多。纯 Sn 易于沉积, 与其他无铅钎料的兼容性良好, 但存在锡须方面的可靠性疑虑。SnCu 的成本低, 兼容性良好, 但是 Cu 含量的变化会导致液相线温度的快速变化。虽然也有一些公司选择了 SnBi 合金, 但是这种镀层存在两个主要问题: 一是含 Bi 合金可能带来 Lift-off 缺陷; 二是由于合金自身的韧性较差(特别是 Bi 含量较高时), 在引线或引线框架成型过



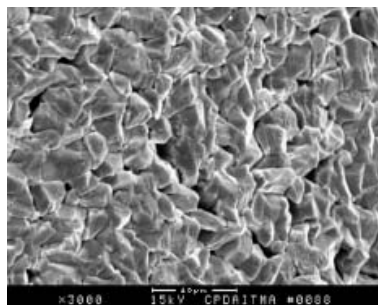
程中会发生表面开裂，这一问题在 SnCu 镀层中也会出现，但在 SnBi 镀层上表现得最为明显（如图 3.17 所示）。



(a) 纯 Sn 表面镀层

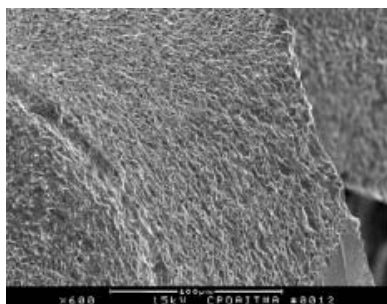


(b) SnCu 表面镀层

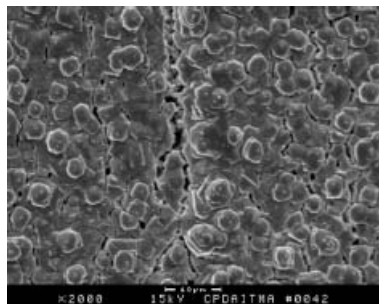


(c) SnBi 表面镀层

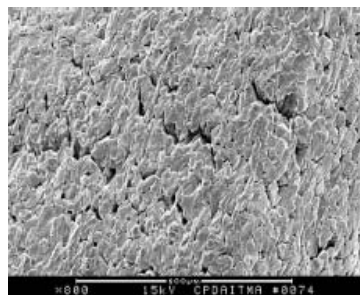
图 3.16 无铅化元器件表面镀层形貌



(a) 纯 Sn 表面镀层



(b) Sn1Cu 表面镀层



(c) Sn3Bi 表面镀层

图 3.17 引线框架经过弯曲成型后其表面镀层形貌



除选择无铅钎料进行替代外,一些新型元器件表面镀层先后出现,其中最有影响和应用前景的就是 Ni/Pd 表面镀层。Ni/Pd 表面镀层工艺与 ENIG 近似,只是在后段中用 Pd 代替 Au,并改变了相应的溶液成分。图 3.18 是 SnPb 与 Ni/Pd 引线表面镀层的对比。Ni/Pd 表面镀层是美国 TI 公司于 1989 年最先用于引线框架的,迄今为止, TI 公司已经在全世界销售了超过 300 亿个采用 Ni/Pd 作为引线表面镀层的集成电路。

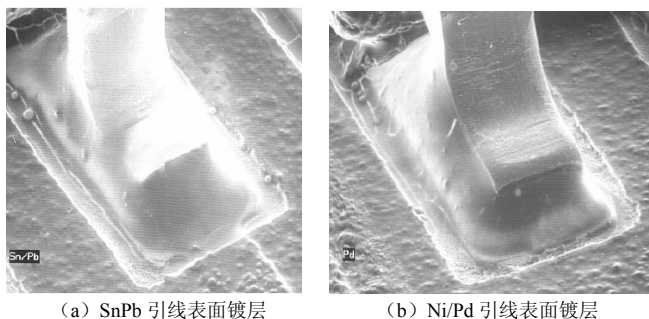


图 3.18 元器件引线表面镀层

3.5.3 从润湿性评估无铅钎料与PCB表面保护层之间的兼容性

相关研究对不同无铅钎料和无铅化 PCB 表面保护层的组合条件下的润湿性进行了试验。无铅钎料有 Sn0.7Cu、Sn3.5Ag、Sn4.0Ag0.5Cu 和 Sn3.4Ag4.8Bi 4 种,同时 Sn37Pb 用于对比。无铅化 PCB 表面保护层有 I-Sn、I-Ag、OSP 和 ENIG 4 种。试验方法为润湿平衡法,试验件设计遵照 IPC J-STD-003 中的规定。同时,为了模拟多次回流或老化的影响,试验件分为三种状态:初始状态,经历过两次回流和经历过四次回流。

图 3.19 和图 3.20 是 PCB 浸 Sn 表面保护层与不同钎料组合条件下的试验结果。由图可见,在初始状态下,浸 Sn 表面有着非常好的可焊性,事实上其最大润湿力的数值是所有表面保护层中最大的。但是经历过回流之后,其可焊性却急剧下降。经过二次回流的浸 Sn 表面只有 SnPb、SnAg、SnAgCu 钎料可以勉强润湿,而经过四次回流的浸 Sn 表面的 SnPb 钎料也无法润湿了。

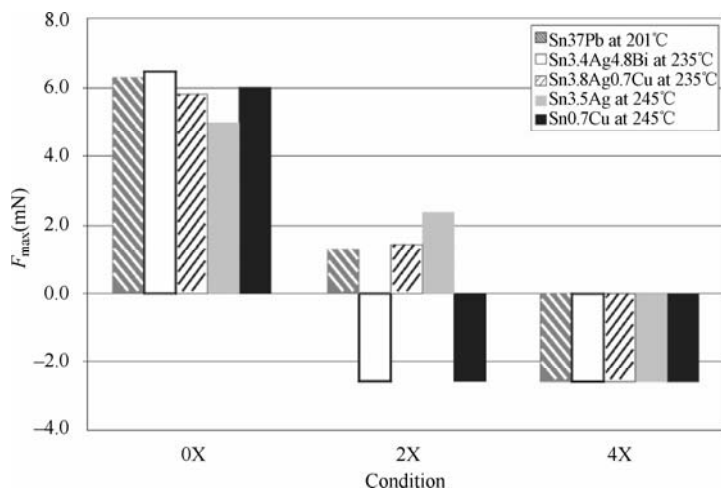


图 3.19 PCB 浸 Sn 表面保护层与不同钎料组合条件下的最大润湿力对比

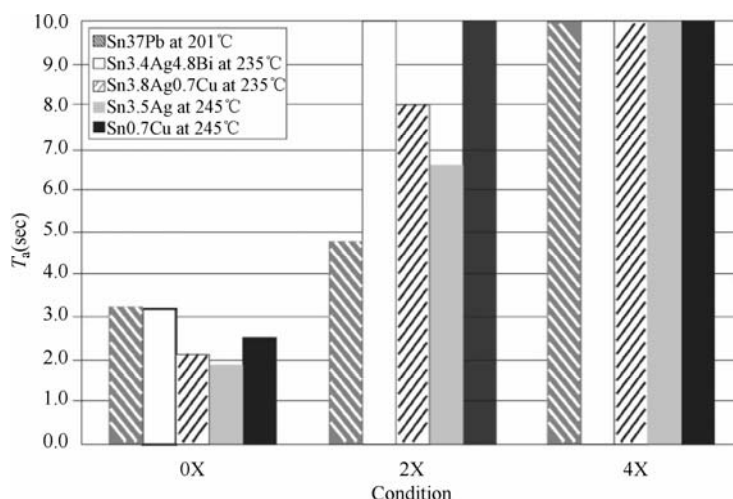


图 3.20 PCB 浸 Sn 表面保护层与不同钎料组合条件下的润湿时间对比

图 3.21 和图 3.22 是 PCB 表面 ENIG 保护层与不同钎料组合条件下的试验结果。在初始状态下,所有钎料在 ENIG 表面均有很好的润湿。经历过二次和四次回流温度循环之后,除 SnAgBi 无铅钎料外,其他组合条件下的润湿力和润湿时间数据仍然相当良好,这表明 ENIG 表面保护层能够承受多次回流。同时也可以看出,除 SnAgBi 无铅钎料外,ENIG 表面保护层与最为流行的 SnCu、SnAg、SnAgCu 无铅钎料之间的兼容性良好。当然,最大润湿力会随着 ENIG 表面经历回流温度循环次数的增多而减小,润湿时间则会增加。

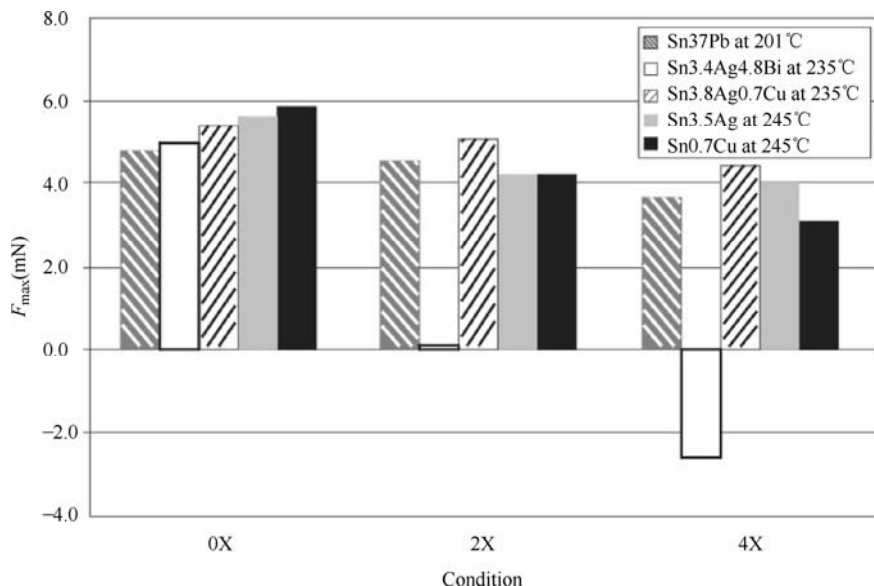


图 3.21 PCB 表面 ENIG 保护层与不同钎料组合条件下的最大润湿力对比

图 3.23 和图 3.24 是 PCB 浸 Ag 表面保护层与不同钎料组合条件下的试验结果。在所有组合条件下,即使是经历了二次和四次回流温度循环,浸 Ag 表面均表现出了良好的可焊性。由此可见,浸 Ag 表面与各个系列的无铅钎料的兼容性良好。同时,浸 Ag 表面有着良好的工艺性,可以承受多次回流。

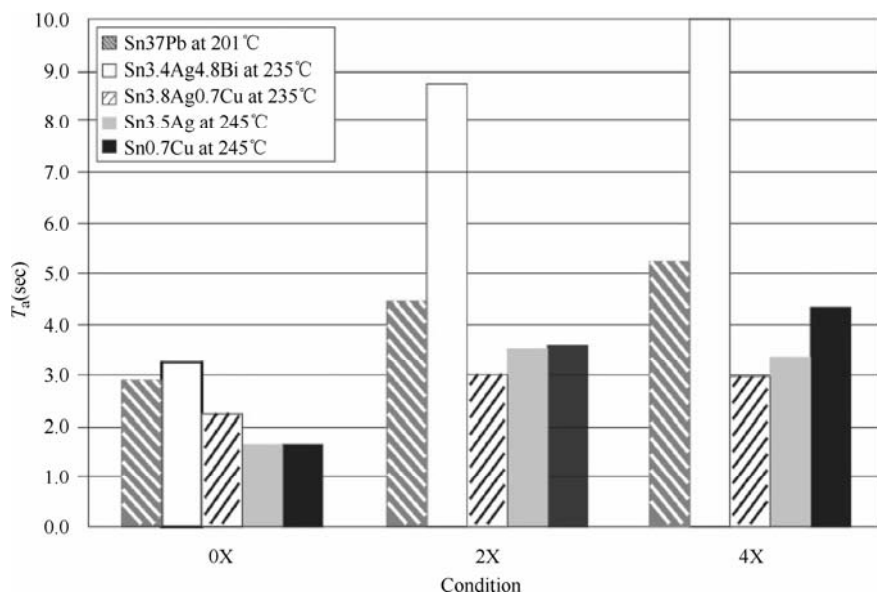


图 3.22 PCB 表面 ENIG 保护层与不同钎料组合条件下的润湿时间对比

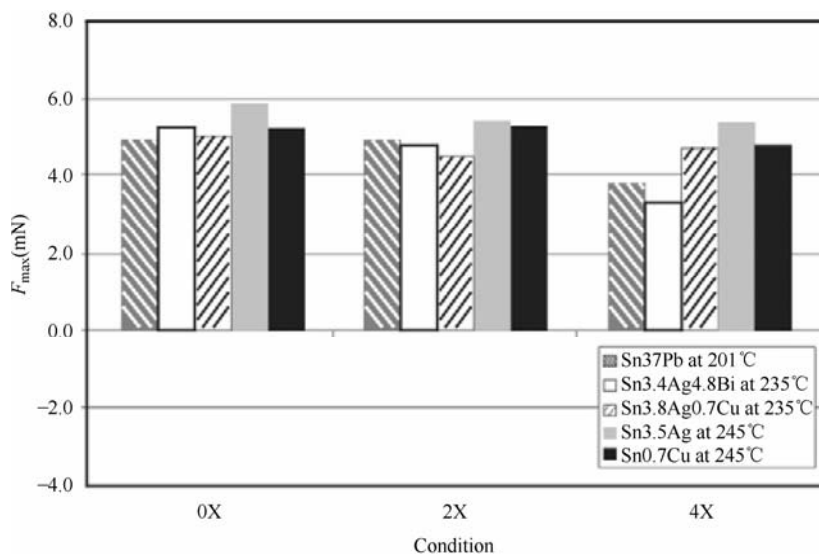


图 3.23 PCB 浸 Ag 表面保护层与不同钎料组合条件下的最大润湿力对比

图 3.25 和图 3.26 是 PCB 表面 OSP 保护层与不同钎料组合条件下的试验结果。在初始状态下, OSP 表面与 SnPb、SnAg、SnAgCu 钎料之间有着良好的润湿性。但是也必须指出, 在所有类型的 PCB 表面保护层中, OSP 表面的最大润湿力这一指标是最低的。经历二次回流温度循环之后, SnCu 和 SnAgBi 已经很难润湿 OSP 表面了。经历四次回流温度循环之后, 无论哪种钎料都无法润湿 OSP 表面了。这一方面表明 OSP 表面并非与所有种类的无铅钎料都兼容, 另一方面也表明 OSP 表面不适合需承受多次回流的场合。当然, 必须指出的是, OSP 表面保护层有多种配方, 此结果可能只具有片面意义。

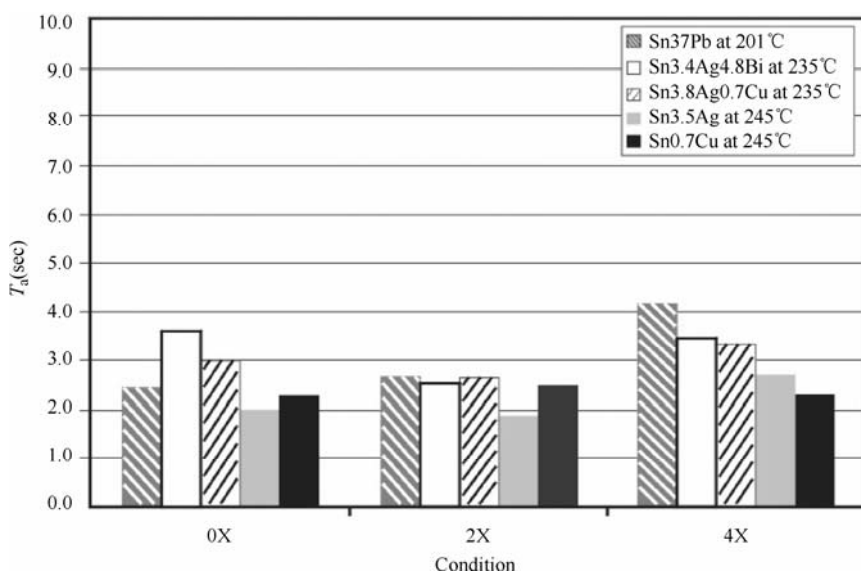


图 3.24 PCB 浸 Ag 表面保护层与不同钎料组合条件下的润湿时间对比

有人借助于大气条件和氮气保护条件下的再流焊试验，对比了不同的无铅钎料与 PCB 无铅化表面保护层组合之间的铺展率。在该研究中，铺展率定义为再流焊后焊点铺展直径 D_R 与钎料膏印刷后的直径 D_P （焊盘为圆形）之间的比值。

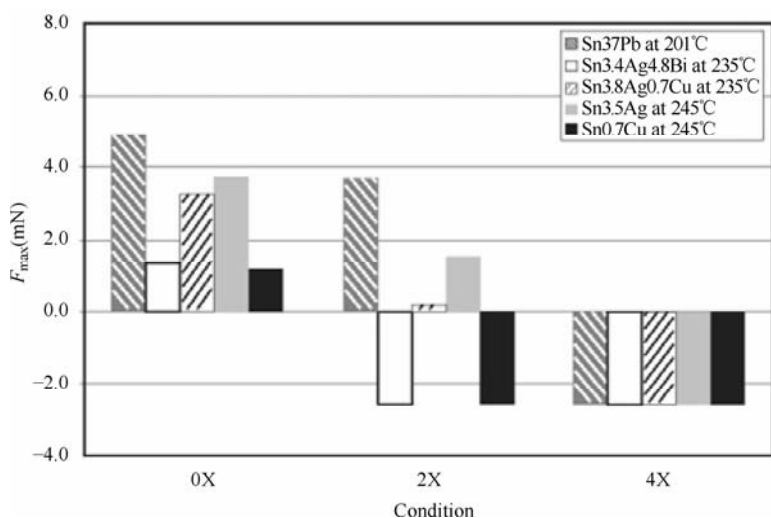


图 3.25 PCB 表面 OSP 保护层与不同钎料组合条件下的最大润湿力对比

图 3.27 是 PCB 表面浸 Sn 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比。可以看出如下几点规律。

① 对于浸 Sn 表面，SnPb 钎料有着最大的铺展率，而 SnCu 钎料有着最小的铺展率。事实上，无铅钎料之间相差无几。

② 对于浸 Sn 表面与 SnPb 钎料的组合，氮气保护能够起到促进润湿铺展的作用，特别是在初始状态下。但是对于浸 Sn 表面与无铅钎料之间的组合，氮气保护的作用就很不明显。

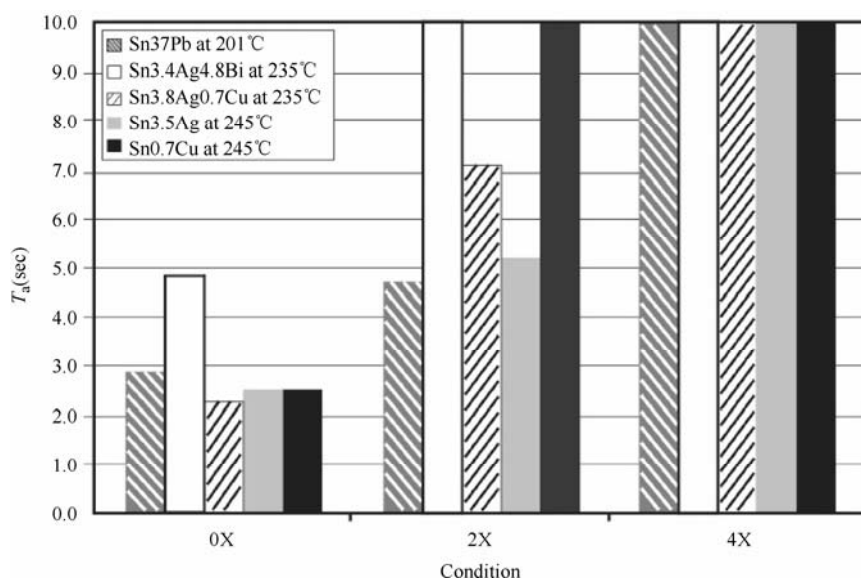


图 3.26 PCB 表面 OSP 保护层与不同钎料组合条件下的润湿时间对比

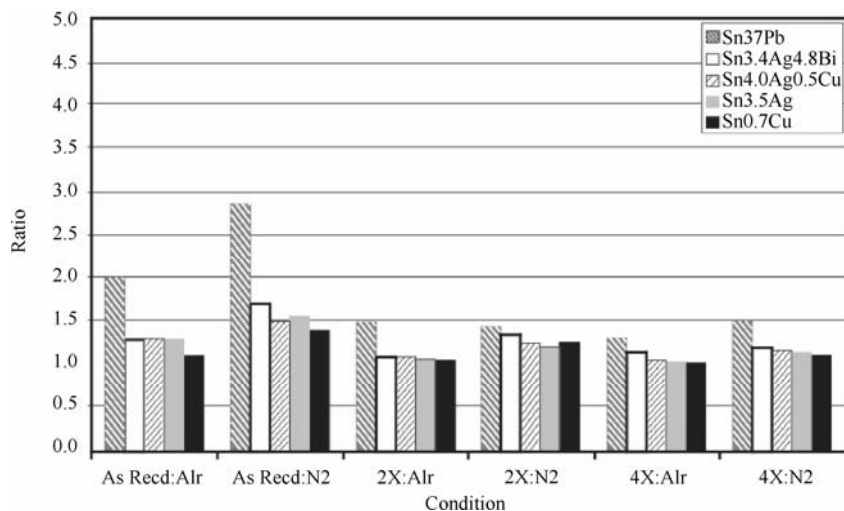


图 3.27 PCB 表面浸 Sn 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比

③ 在初始状态下，无铅钎料在浸 Sn 表面尚有 1.2~1.5 的铺展率。但是当 PCB 经历过回流温度循环之后，铺展率仅为略大于 1.0，这意味着此时无铅钎料在浸 Sn 表面几乎没有什么铺展。

图 3.28 是 PCB 表面 ENIG 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比。可以看出如下几点规律。

① 对于 ENIG 表面，无铅钎料表现出了良好的铺展率。其中 Sn-Cu 钎料有着最大的铺展率。

② 氮气保护条件促进钎料润湿铺展的作用在 ENIG 表面上得到了充分体现。特别是对于无铅钎料与初始状态 ENIG 表面的组合，氮气保护条件下的铺展率提高了将近 100%。

③ 即使 ENIG 表面经历过多次回流温度循环，无铅钎料仍可以在上面良好地润湿铺展。

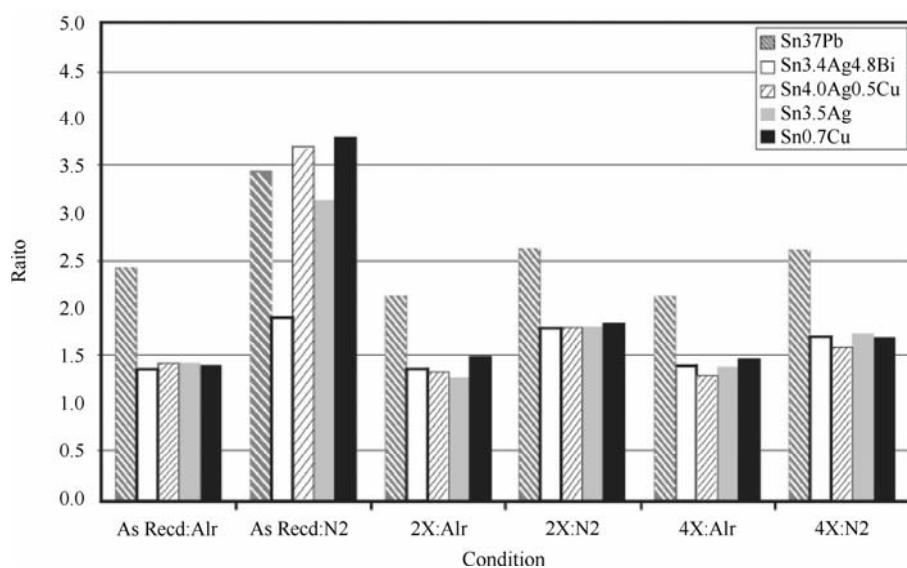


图 3.28 PCB 表面 ENIG 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比

图 3.29 是 PCB 表面浸 Ag 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比。可以看出如下几点规律。

- ① 对于浸 Ag 表面，Sn-Pb 钎料没有表现出比无铅钎料特别优异的铺展率。这一点与其他 PCB 表面保护层的情况是很不相同的。
- ② 对于浸 Ag 表面，氮气保护没有表现出明显可以促进润湿铺展的作用。
- ③ 是否经历过多次回流温度循环对浸 Ag 表面的可焊性影响很小。

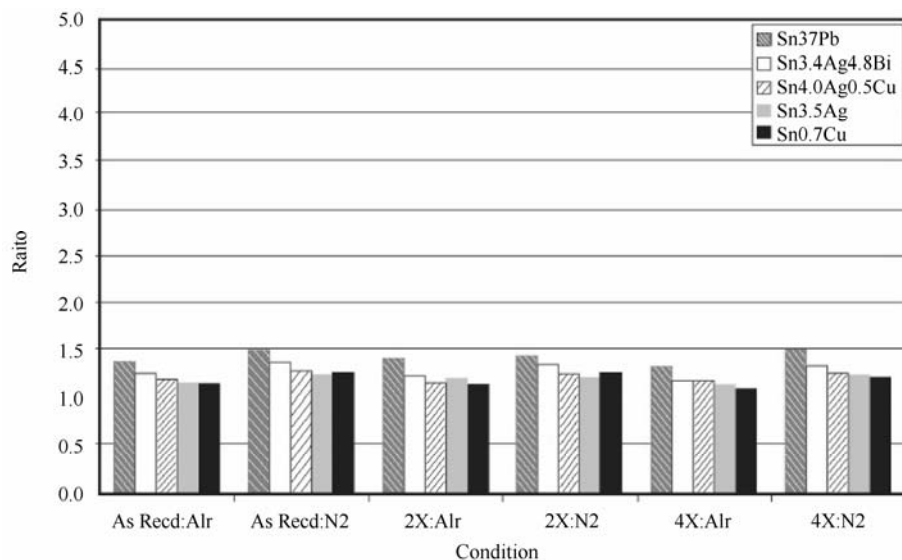


图 3.29 PCB 表面浸 Ag 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比

图 3.30 是 PCB 表面 OSP 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比。可以看出如下几点规律。

- ① 对于 Sn-Pb 钎料与 OSP 表面保护层的组合而言，氮气保护有着明显的促进润湿铺展



的作用。而对于无铅钎料与 OSP 表面保护层的组合而言,氮气保护的作用就没有那么明显了。

② 对于 OSP 表面而言,无论是大气条件还是氮气保护条件,各种无铅钎料的铺展率均接近于 1.0,这意味着无铅钎料在 OSP 表面几乎没有什么铺展。

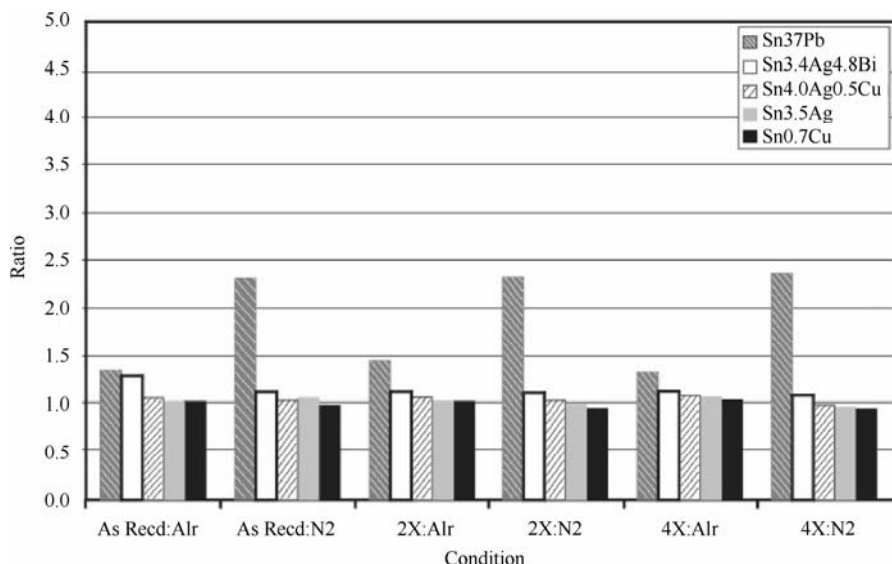


图 3.30 PCB 表面 OSP 保护层与不同钎料组合条件下的铺展率对比

图 3.31 为美国 Boeing 公司提供的浸 Ag、OSP 和 ENIG 等 PCB 表面保护层与 Sn3.8Ag0.7Cu 无铅钎料膏组合条件下的再流焊焊点表面形态。图 3.32 为浸 Ag、OSP 和 ENIG 等 PCB 表面保护层与 Sn0.7Cu 无铅钎料组合条件下的波峰焊焊点表面形态。其中片式元件的焊接端表面镀层均采用的是浸 Sn0.7Cu 无铅钎料工艺。

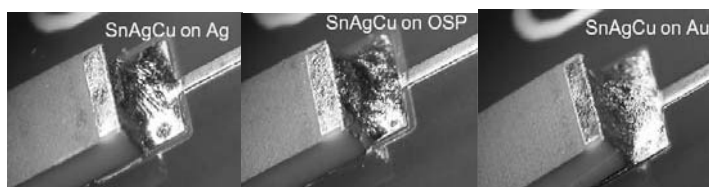


图 3.31 不同 PCB 表面保护层的无铅再流焊焊点

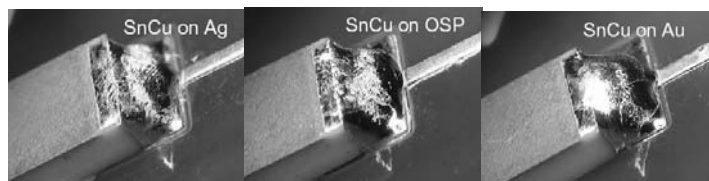


图 3.32 不同 PCB 表面保护层的无铅波峰焊焊点

3.5.4 从润湿性评估无铅钎料与元器件表面镀层之间的兼容性

相关研究对不同引线材料、引线表面镀层材料与 SnAgCu 无铅钎料组合条件下的润湿性能进行了试验,并与传统 SnPb 钎料进行了对比,见表 3.18。其中预处理条件 A 为 105℃、

100%RH 下老化 4 个小时，B 为 100℃、100RH 下老化 4 个小时。

表 3.18 SnAgCu 无铅钎料与不同无铅化表面镀层之间的可焊性

引线框架材料	镀层材料	共晶钎料成分 (测试温度)	预处理条件	润湿平衡法试验结果 润湿时间 (s)			润湿面积
				最大	最小	平均	
Fe-Ni	Sn-Cu	SAC (245℃)	A	0.4	0.3	0.36	≥95%
Cu	Sn-Cu	SAC (245℃)		0.8	0.4	0.56	≥95%
Fe-Ni	Sn-Cu	SnPb (230℃)		0.4	0.2	0.30	≥95%
Cu	Sn-Pb	SnPb (230℃)		0.8	0.4	0.5	≥95%
Cu	Sn-Bi	SAC (245℃)	B	0.45	0.34	0.39	≥95%
Cu	Sn-Bi	SnPb (230℃)		0.53	0.38	0.48	≥95%
Cu	Ni/Pd/Au	SAC (245℃)		0.44	0.4	0.43	≥95%
Cu	Ni/Pd/Au	SnPb (230℃)		0.49	0.45	0.47	≥95%
Cu	Sn-Pb	SnPb (230℃)		0.61	0.33	0.44	≥95%

图 3.33 是 Infineon 公司提供的 Sn3.8Ag0.7Cu 无铅钎料与不同无铅化表面镀层之间的润湿性能试验结果。图 3.34 是 SnPb 钎料的相关数据，用于对比。试验件为不同形式的表面贴装元件（见图中横坐标的说明，相应的引线框架材料见表 3.19），表面镀层的预处理条件为 96℃的蒸汽老化 8 个小时。试验条件为：SnAgCu 钎料，245℃，热浸 3s；SnPb 钎料，215℃，热浸 3s。

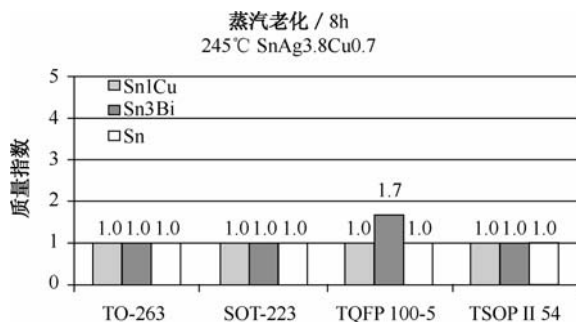


图 3.33 Sn3.8Ag0.7Cu 无铅钎料与不同无铅化表面镀层之间的润湿性能

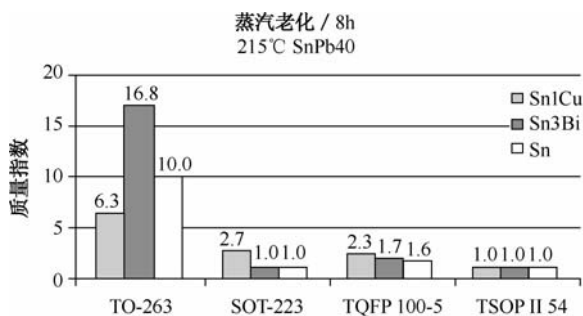


图 3.34 Sn63Pb37 钎料与不同无铅化表面镀层之间的润湿性能



表 3.19 不同封装形式所采用的引线框架材料

封装形式	引线框架材料成分 (%)
TQFP-100	3Ni, 0.65Si, 0.15Mg, <0.2Fe, <1.0Zn, 其余为 Cu
TO-263	0.1Fe, 0.03P, 其余为 Cu; 或者 0.1Sn, <0.02Ni/Zn, 其余为 Cu
SOT223	0.3Cr, 0.07Ti, 0.35Si, 其余为 Cu
TSOPII-54	FeNi42

图中纵坐标的 Quality number 是 Infineon 公司提出的用于表征润湿性能的参数:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^5 N_i F_i}{T} \quad (3.3)$$

式中, N_i 为属于测试结果类型 i 的元器件数目; F_i 为类型 i 的权重因子; T 为试验用元器件的总样本数。相应的具体定义见表 3.20。Infineon 公司的内部标准是 Q 值要小于 1.4。

表 3.20 用于评价润湿性能的参数定义

试验结果类型	1	2	3	4	5
所对应的未润湿面积 (%)	0~5	6~10	11~20	21~40	>40
权重因子	1	5	20	50	100
Q	1	1.36	1.73	2.09	2.82
润湿面积	>96.5	96.0	95.6	95.1	94.2
					<93.8

由以上试验结果可以总结出以下几点规律。

① 即使表面镀层材料相同, 不同的引线/引线框架材料也会导致不同的润湿性能。其中润湿表现最好的是 42 合金。

② 总体而言, 纯 Sn 表面镀层的可焊性最好。

③ SnCu 钎料表面镀层与 SnBi 钎料表面镀层之间没有明显的差别。

④ 对于同样的无铅化表面镀层而言, SnPb 钎料与无铅钎料之间没有表现出明显的润湿性差别。相反, 对于某些特殊引线基材, 如表 3.19 中 TO-263 的引线基材, 无铅钎料的润湿性更佳。

思考题

1. 简述 SnPb 合金钎料的特点。
2. 简述无铅钎料定义及主要合金成分。
3. 简述钎料合金选用的工艺性能要求。
4. 简述助焊剂的组成与分类。
5. 简述助焊剂的性能评估内容。
6. 简述钎料膏的组成及合金粉的分类。
7. 简述钎料膏的保管与使用要求。
8. 简述无铅 PCB 表面保护层及其特点。
9. 简述无铅元器件引脚/焊端表面保护层及其特点。

第4章 再流焊接技术



本章要点

-  再流焊接工艺特点
-  再流焊接温度曲线
-  再流焊接传热技术
-  红外再流焊接技术
-  热风再流焊接技术
-  红外+热风复合加热再流焊接技术
-  汽相再流焊接技术 (VPS)
-  再流焊炉设计参数及应用
-  无铅再流焊接工艺技术
-  再流焊接常见缺陷及防治措施



4.1 再流焊接工艺特点

再流焊接工艺是指在软钎焊操作期间不必另外添加钎料，而是通过使预先放置好的钎料经过重新熔化来形成软钎焊焊头的一类方法。再流焊接使用的连接材料是钎料膏，通过印刷或滴注等方法将钎料膏涂敷在 PCB 焊盘上，再用专用设备（贴片机）在上面放置 SMD，然后加热使钎料熔化，即再次流动，从而实现连接。在完成整个钎焊的过程中，钎料膏有两次流动过程，第一次是钎料膏在印刷刮板和丝网/模板强力下流动，沉积在焊盘上，第二次是钎料膏在再流焊炉中受热熔化至流动，完成钎焊过程，再流焊接也因此而得名。

钎料膏在整个焊接过程中，一共发生 5 个阶段的物理变化。

① 首先，用于调节黏度和印刷性能的溶剂开始蒸发。温度上升必须慢（一般 $\leq 3^{\circ}\text{C/s}$ ），以限制沸腾和飞溅，防止形成小钎料珠。另外，一些元器件对内部应力比较敏感，如果元器件温度上升太快，会造成断裂。

② 助焊剂开始激活，化学清洗行为开始，水溶性助焊剂和免清洗助焊剂都会发生同样的清洗行动，只不过温度稍微不同。将金属氧化物和某些污染物从即将结合的金属和钎料颗粒表面清除，以获得冶金学上所要求的良好焊点的清洁表面。

③ 当温度继续上升，钎料颗粒首先单独熔化，并通过表面的芯吸过程聚合在一起，以利于在所有可能的表面上覆盖，并开始形成焊点。

④ 当单个的钎料颗粒全部熔化后聚合在一起形成液态钎料时，表面张力发挥作用开始形成焊点。如果元器件引脚与 PCB 焊盘的间隙超过 0.1mm，则极可能由于表面张力使引脚和焊盘分开，造成焊点开路。

⑤ 冷却阶段。如果冷却过快，焊点强度会稍微大一点，但不可太快以避免产生元器件内部的热应力。

4.2 再流焊接温度曲线

4.2.1 温度曲线的基本特征

图 4.1 为典型再流焊接温度曲线示意图，可分为 6 个阶段，每个阶段都有各自的要求和功能，依次为预热阶段、焊剂挥发阶段、净化阶段、钎料熔融扩散阶段、钎料冷却凝固阶段和 PCBA 冷却阶段。

（1）阶段：预热基板及元件阶段。此阶段吸收热量最多，温度爬升较快，但太快易产生焊球飞溅和钎料膏塌陷，因为快速升温会改变钎料膏的黏度。因此，上升斜率一般为 $1\sim 3^{\circ}\text{C/s}$ ，典型值为 2°C/s ，最大不超过 4°C/s ，直到 $95\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，停留时间在 2min 内。

（2）阶段：净化、去氧化、保温及除湿阶段。一般焊剂活化温度为 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，无铅钎料为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，具体根据钎料膏生产商提供的曲线设定。此阶段为较长平坦段，有铅一般为 $60\sim 90\text{s}$ ，无铅一般为 $30\sim 90\text{s}$ ，此阶段曲线呈缓升或平稳态。

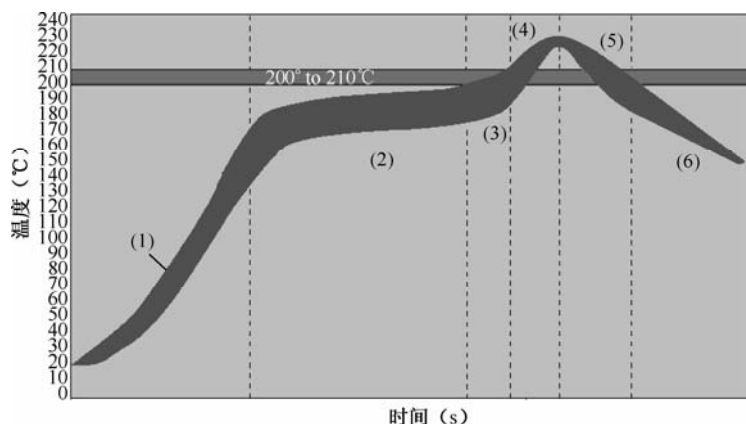


图 4.1 典型 6 阶段再流焊接温度曲线示意图

(3) 阶段：净化过渡阶段。进入焊接阶段前，高熔点焊剂再次净化焊接区，同时顺利过渡。此阶段温度爬升不宜过快，否则在钎料熔化时会产生锡珠。

(4) 阶段：钎料熔化扩散焊接阶段。有铅焊接的峰值温度一般高于合金熔点 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，即 Sn37Pb 共晶钎料的典型峰值温度为 $205\sim 230^{\circ}\text{C}$ ，液相线以上的停留时间为 $60\sim 90\text{s}$ ， 200°C 以上为 $20\sim 60\text{s}$ ；无铅焊接的峰值温度一般高于合金熔点 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，即典型峰值温度为 $235\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，液相线以上的停留时间为 $30\sim 90\text{s}$ ， 230°C 以上为 $15\sim 55\text{s}$ 。如果温度太高或时间过长易损伤基板和元件，元件焊端还会发生银耗现象，降低强度。

(3)、(4) 阶段温度上升不能太快，斜率推荐为 $2\sim 3^{\circ}\text{C/s}$ 。过快易引起较大元器件热应力，造成元器件机械损伤，还有元件会竖起或歪斜。

(5) 阶段：冷却固化阶段。要求快的冷却速率，保证液相线以上的时间，避免太长而造成金属间化合物太厚。冷却速率一般为 $3\sim 6^{\circ}\text{C/s}$ ，推荐为 $3\sim 4^{\circ}\text{C/s}$ ，考虑到金属冷却结晶过冷度的影响，一般温度需降到 130°C （有铅）或 170°C （无铅）。

(6) 阶段：自然冷却阶段。缓慢冷却，避免造成较大的热应力而损伤元件，这种情况对片式电容尤为严重，一般冷却到 75°C 以下即可。

目前再流焊曲线通常被划分为 4 阶段：预热区、保温区、再流区和冷却区，即上述 (3)、(4) 阶段合为再流区，(5)、(6) 阶段合为冷却区，如图 4.2 所示。

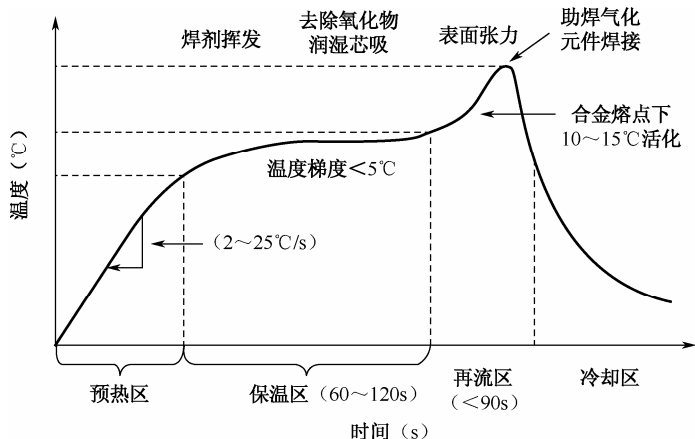


图 4.2 传统 4 阶段再流焊接温度曲线示意图

4.2.2 典型温度曲线类型

再流焊接温度曲线的设定要参考钎料合金成分、熔点及与之配合的助焊剂特性。表 4.1 为可能用到的无铅合金及熔点，合金成分不同，温度曲线工艺规范也不同。但从形状来看，最常见的有传统马鞍型温度曲线（RSS）和帐篷型温度曲线（RTS），如图 4.3 所示。传统马鞍型温度曲线（升温—保温方式）应用最多，它有一个平缓保温区，主要目的是活化助焊剂和减小温度偏差，主要应用于松香基助焊剂及吸热量偏差较大的 PCBA。近年来由于低残留、免清洗钎料膏的出现，不需要高温停留阶段，温度曲线变为逐步升温后进入再流焊区，即帐篷型温度曲线，主要应用于免清洗及水基助焊剂和吸热量偏差小的 PCBA。

表 4.1 再流焊接技术中可能用到的无铅合金及熔点

合金系统及定义	成分（质量%）	固相线	液相线
高温合金： S: 217℃ 以上 L: 225℃ 以上	Sn5Sb	238	241
	Sn0.7Cu	227	227
	Sn0.7Cu0.3Ag	217	226
中高温合金： S: 217℃ 以上 L: 225℃ 以下	Sn3.5Ag	221	221
	Sn3.0Ag0.5Cu	217	219
	Sn3.8Ag0.7Cu	217	217
中温合金： S: 217℃ 以下，150℃ 以上 L: 200℃ 以上	Sn2.5Ag1Bi0.5Cu	213	218
	Sn3.5Ag4In0.5Bi	207	212
	Sn3.5Ag8In0.5Bi	196	206
中低温合金： S: 150℃ 以上，L: 200℃ 以下	Sn9Zn	98	198
	Sn8Zn3Bi	190	196
低温合金： S: 150℃ 以下	Sn58Bi	139	139
	Sn52In	119	119

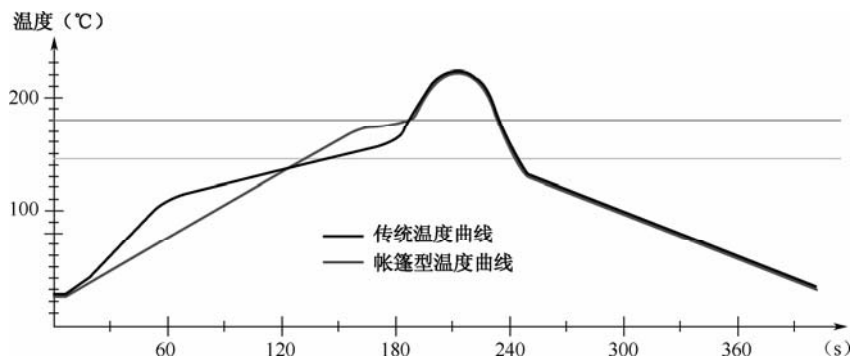


图 4.3 再流焊接技术中的经典温度曲线

4.2.3 加热因子

简单的加热因子 Q_p 定义为再流焊温度曲线在钎料液相线温度以上的温度对时间的积分，相当于再流焊温度曲线在熔点温度以上的面积：



$$Q_{\eta} = \int_{t_1}^{t_2} [T(t) - T_m] dt \quad (4.1)$$

式中, t_1 、 t_2 是再流焊接时间; Q_{η} 的单位是 $s \cdot ^\circ C$ 。

如果焊接区的再流焊温度曲线不是三角形, 或在估算某个焊区的 Q_{η} 时, 可将温度曲线用三角形近似, 于是有

$$Q_{\eta} = \frac{1}{2}(t_2 - t_1) \cdot (T_{\max} - T_m) \quad (4.2)$$

Q_{η} 过大或过小, 都会使焊点的振动和弯曲疲劳寿命降低。有人对一组 Sn37Pb 合金焊接的 Micro BGA 试样在不同加热因子下的振动和弯曲疲劳寿命下进行了实验, 结果发现锡铅共晶钎料的加热因子最佳的范围为 $600 \sim 900 s \cdot ^\circ C$, 如图 4.4 所示。为了保证良好的疲劳寿命, 一些厂商对常用钎料膏的推荐再流焊温度曲线进行计算, 所得到的 Q_{η} 值也基本处于这个范围内 (见表 4.2), 因此, 利用加热因子可以对再流区的工艺设定进行简单的评估。表 4.3 给出了常见无铅钎料加热因子 Q_{η} 与可靠性之间的对应关系, 最佳的范围在 $300 \sim 700 s \cdot ^\circ C$ 之间, 相对于锡铅钎料偏低, 可能的原因是无铅焊接的高温加速了原子间的扩散, 导致形成类似的组织及界面化合物所需加热因子偏低。

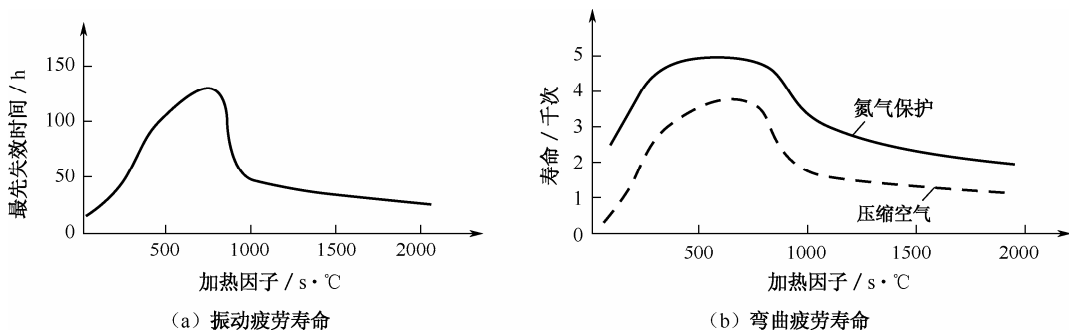


图 4.4 加热因子对 Micro BGA 疲劳寿命的影响

表 4.2 有铅钎料加热因子的取值范围

品牌	钎料类型	加热因子范围
Qualitek	Sn37Pb	660~1100
	Sn36Pb2Ag	780~1170
Alpha	Sn37Pb	630~810
Heraeus	Sn37Pb	720~740
	Sn36Pb2Ag	800~830

表 4.3 无铅钎料加热因子取值范围

加热因子 Q_{η} ($s \cdot ^\circ C$)	IMC 厚度 (μm)	试样个数	失效焊点总数	平均寿命次数
33	0.4	8	14	2540
205	0.6	12	23	3834
307	0.7	12	17	4659



续表

加热因子 Q_T ($s \cdot ^\circ C$)	IMC 厚度 (μm)	试样个数	失效焊点总数	平均寿命次数
682	1.0	12	14	4804
864	1.2	8	15	2585
2004	2.1	12	26	1795

4.2.4 带宽与工艺窗口

1. 焊点与焊区

电子装联的焊接过程，就是将钎料加热到熔化并以此填充到被焊金属的焊缝中，待钎料冷却、凝固之后形成焊点，实现元器件与 PCB 电路的连接。填充到焊缝中的钎料也称为填料，填料凝固之后就形成了焊点。需要焊在一起的金属部位也称为焊区，如一个元器件引脚与对应的 PCB 焊盘或金属化通孔就共同组成了一个焊区。本书中将焊区有时也称为焊点，这时它所表达的只是一个需要焊接的部位或位置的概念。

2. 温度宽带 (Bandwidth)

为了使熔融钎料填满焊缝，在焊接过程中也需要将焊区加热到一定温度；否则，液态钎料在流动的过程中可能因焊区温度过低而凝固，从而影响后续钎料对焊缝的继续填充。其实，将焊区加热到一定温度也是液态钎料润湿被焊金属，进而与被焊金属形成牢固的冶金连接的要求，否则就可能造成“冷焊”等缺陷。

现代电子装联采用将装联组件整体加热的方法（再流焊接或波峰焊接）来实现焊区的升温与钎料填充。在这种整体加热的焊接工艺中，一个焊区的最低温度及其持续时间受到钎料的熔化特性和形成一个优良焊点的客观要求的限制。例如，在再流焊接中，助焊剂发挥、钎料熔化及润湿、铺展都需要一定的时间，且在此时间内，钎料要保持其熔化状态。从钎料的熔化特性上看，共晶合金加热到熔点以上就全部熔化，而非共晶合金只有达到液相温度线以上才会全部转化成液体。因此，钎料的液相温度决定了焊区的最低温度要求。

随着电子产品的日益复杂，一个 PCB 上可能会出现成百上千个焊点（也即焊区）。受元器件大小、热容量、相互位置及焊接设备的加热方式等的共同影响，在这种整体加热的焊接工艺中，各焊区的温升速率可能并不相同，有些焊区可能很快就达到了预定温度，有些焊区则需要很长的时间才能达到预定温度。因此，焊区之间往往有一个温度差。通常，将一个装联组件在焊接时的最高焊区温度与最低焊区温度之差称为该组件的温度宽带。实际生产有铅工艺中，温度带宽根据产品不同而不同，一般手机板 $\leq 10^\circ C$ ，笔记本电脑 $\leq 35^\circ C$ ，大型服务器 $\leq 40^\circ C$ 。

3. 工艺窗口 (Window)

为了使各个焊区能有统一的焊接质量，除了要求进行仔细的装联工艺设计以减小温度带宽或升温速率差之外，通常还要求提高焊接的加热温度，确保最低的焊区温度也能达到预定值。但是在整体加热时，加热组件的最高温度受到了包括 PCB、电子元器件、助焊剂等在内



的装联组件各个部分的耐热特性的限制。按照目前的有关标准,电子元器件的最高耐热温度一般都限制在 260°C 以下,而许多元器件,如电解电容、继电器和温度敏感元件的最高耐热温度或耐热时间会更低(短)一些。为了避免热损伤,就要限制最高加热温度及其持续时间,否则可能引起元器件的封装体爆裂、性能受损、PCB 变形、聚合材料或助焊剂失效等。

为了表达这种工艺上的要求,通常把焊接时所允许出现的最高加热温度称为焊接峰值温度,把由峰值温度及其持续时间、钎料液相温度所共同确定的温度范围称为该组件的焊接工艺窗口。显然,对于温升速率最高的焊区,如微小元器件,这一设置也就决定了该焊区理论上所能达到的最高温度。因此,峰值温度及其持续时间不应超过组件各部分的耐热性要求。另外,工艺窗口也对温升速率最低的焊区提出了具体的工艺要求,即焊区的温度必须达到钎料的液相温度线以上。因此,工艺窗口综合反映了焊接峰值温度及其持续时间设定、焊区的最低温度要求,以及装联组件所允许出现的最大理论带宽等重要的工艺信息。实际焊接时,组件的实际带宽要落入工艺窗口之内才能确保焊接质量。

4. 工艺窗口与带宽的进一步考虑

实际焊接时,常不能准确地预测到各个焊区的实际温升速率、峰值温度及其持续时间,经常是以反复实验的方法进行确定的。常用的做法是在测试板上选择有代表性的 5~8 个焊区(也应包括特定的 PCB 边缘位置)放置温度传感器(一般为 K 型热电偶),然后进行组件加热并观测上述焊区的温升曲线,如此不断地调整峰值温度和持续时间,直到观测温升曲线全部落入工艺窗口为止。

焊区由室温升高到设定温度总是需要一定时间的。随着装联组件的复杂性逐渐增加,一个 PCB 上可能搭载尺寸、热容量差异很大的元器件类型,不同的引脚焊区一般都存在一定的温差,如果将组件的峰值温度设定在 260°C ,则升温快的元器件可能因达到峰值温度而受损,而升温慢的元器件的引脚焊区可能还未达到预定温度。因此,实际焊接所设置的峰值温度一般都要低于 260°C 。在此前提下,为了取得满意的焊接质量就要减小温度带宽。为了减小温度带宽,通常需要进行仔细的装联设计(包括元器件类型选择、元器件布局等),确保各个焊区能有较为一致的温升速率,以此减小温度带宽;同时,从工艺角度考虑,一般都设置了几个预热阶段,通过“升温—保温”逐步提高组件的焊区温度,只是到了最后的焊接阶段才将各焊区尽可能快地加热到工艺窗口所要求的温度范围。这样,组件的实际受热一般也就达不到设定的峰值温度,从而避免了热损伤。工艺窗口对应的持续时间因焊接工艺的不同而不同。再流焊接的持续时间一般约为数十秒,在这段时间内要保证预置于焊区内的钎料全部熔化并润湿焊接表面。

应用: 钎焊温度必须高于钎料合金的最低过热温度,也称润湿温度。理论上最低过热温度要高出钎料液相线温度 15°C 左右,即锡铅钎料的焊接润湿温度一般为 198°C 。无铅焊接由于工艺窗口变窄,实际生产中的焊接润湿温度一般为 230°C (氮气保护时可降到 225°C)。针对焊接峰值温度而言,一般锡铅钎料为 $210\sim 220^{\circ}\text{C}$ (其具体值与被焊组件的大小、元器件加热特性等有关),远远低于现有元器件 260°C 的最高耐热标准,有近 50°C 的窗口宽度,足以保证复杂组件的各个焊区都达到钎料的熔化温度之上。无铅钎料熔点或液相线温度高出锡铅钎料 40°C 左右,这就意味着采用无铅钎料时焊接工艺窗口相应变窄。例如, SAC305 合金的焊接峰值温度通常要高于 235°C ,这样窗口宽度只有 18°C ,即使将峰值温度设置在 250°C ,



其窗口宽度也仅有 33°C 左右, 且更高的温度设置也可能造成装联组件的热损伤和助焊剂失效。狭窄的工艺窗口要求装焊组件的温度带宽也要变窄, 这就对焊接时的温度控制提出了更高的要求。

为保证无铅焊接的装联质量, 在使用无铅钎料时需要考虑以下两方面问题。

① 要优化装联工艺设计, 包括采用先进的焊接设备、优化的焊接工艺条件、合理的元器件选型与布局及热容量的匹配性, 确保各个焊区能有较为一致的升温速率, 以便通过减小温度带宽来降低窗口的最高加热温度和缩短加热时间。

② 要选择较低熔点的钎料合金, 同时确保钎料合金与焊区金属的兼容性。不同的钎料合金在不同的被焊金属表面上具有不同的润湿特性, 通过选择恰当的钎料可以缩短润湿、铺展过程, 减少组件的受热时间。

总之, 合金的液相线温度越高, 焊接时的工艺窗口就越窄, 从而给带宽控制提出了更高的要求。若有不当, 很容易造成组件热损伤、产生焊接缺陷或影响生产效率。因此, 加强装联设计、焊接工艺控制就成为提高焊接质量和效率的主要手段。

4.2.5 温度曲线设置影响因素

温度曲线设置的主要参考因素包括以下几个方面。

① 焊剂挥发及活化温度、钎料熔点温度等。对于钎料膏来说, 焊剂挥发温度、活化温度和合金熔化温度是温度设定需要参考的几个重要参数。当焊接出现质量问题时, 就要从焊接机理出发, 分析可焊性, 从而引起对助焊剂和钎料合金的物理性质的重视。

② PCB 物理尺寸、玻璃转化温度、分解温度及受潮情况。当焊接时出现铜箔断裂、吹气孔、翘边等质量问题时, 就要从此类方面入手进行温度曲线的调整。

③ PCBA 组装密度、元件类型及大小, 有无 PLCC、BGA、CSP 等吸热量较大的封装件。此方面会影响到焊区的温度爬升、温度均匀性及温度补偿性。

④ 设备的具体性能, 如加热区的长度、发热功率、热传导方式及传热效率等。例如, 热风与红外加热方式、不锈钢整流板与铸铝整流板方式、小循环与微循环热风方式等。

温度曲线设置后, 焊区工艺窗口中的峰值温度与时间有关, 其核心是参考加热因子设定, 并保证所有焊点都落入窗口内部。一般采用 6 通道以上的测温仪对最高温度、最低温度、斜率敏感温度、温度均匀性等进行测试与判断。值得注意的是, 本书中所述温度均为实测温度, 而非设定温度, 一般设定温度要高于实测温度。

4.2.6 温度曲线测试及优化

目前主流的再流焊接技术有热风再流焊、红外再流焊和汽相再流焊等。强制热风对流再流焊接技术, 以其独特的优势成为市场的主流。再流焊接工艺是一种自动群焊技术, 在很短时间内必须同时完成上万个焊点的焊接, 其焊接质量的优劣直接影响到产品的质量和可靠性。再流焊接工艺中影响焊点质量的因素主要包括材料、设备、工艺规范、环境及操作者技能等, 其中操作者调制的温度曲线是否合理对焊接质量起着决定性作用。本节以热风再流焊炉工艺参数设定与温度曲线调试为例, 介绍温度调试的步骤与技巧。



对于质量控制，必须通过测试温度曲线对工艺进行确认，尤其是对图 4.5 所示的高密度组装电子产品，其工艺窗口很窄，任何小的波动都可能会引起质量问题。再流焊接制程主要是确定温度曲线，主要参数是预热温度、预热时间、焊接峰值温度及液相线以上时间等。在实际生产中，当制作一个新工艺或更换工艺时，需制作新温度曲线，推荐采用实装板进行测试，但一般其有效使用次数不超过 50 次。

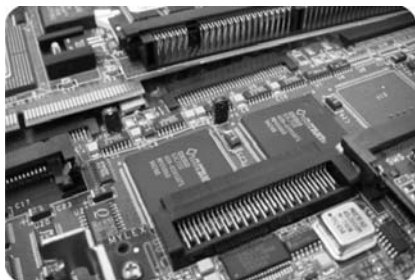


图 4.5 高密度组装电子产品

1. 测温热电偶固定方法

制作温度曲线测试板时，热电偶固定方法有 4 种：高温钎料连接、铝带连接、Kapton tape（常用高温胶带）连接、传导树脂（胶粘剂）连接。对于这 4 种方法，高温钎料最可靠，重复性也最好；铝带也可靠，但是重复性差一点；Kapton tape 是一种热传导很好的电带，但可靠性和重复性都差一点；传导树脂的可靠性可以，但重复性很差，其具体安装如图 4.6 所示。

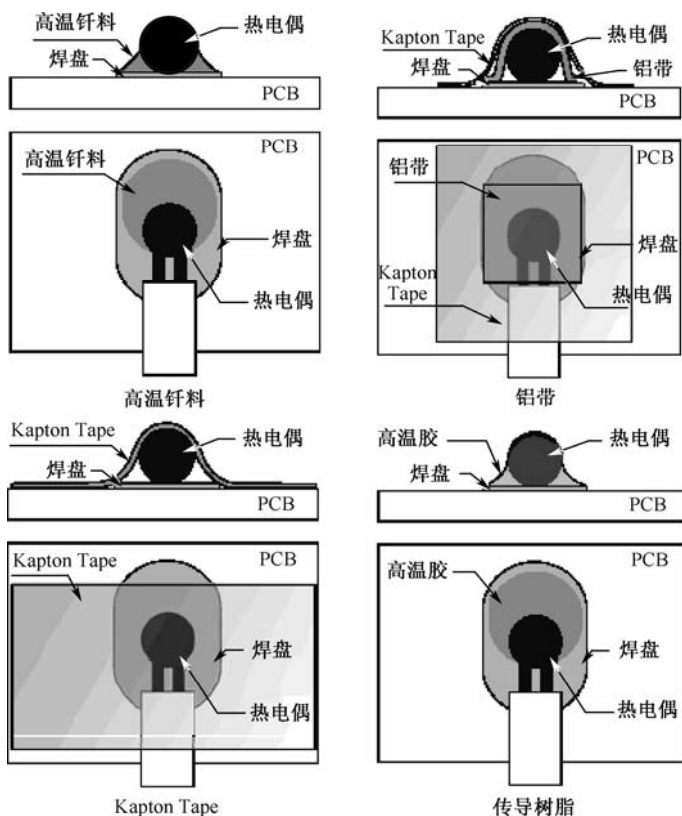


图 4.6 热电偶固定方法

2. 温度曲线调试的基本步骤

对一台具体的设备来说，焊接时间的长短主要通过调整链条（或网带）速度来实现。不



同阶段的时间长短以链速为基准值成正比变化,因此设定某个阶段时间还要考虑相应的其他阶段的时间是否合理。对于温度曲线的调试,可按照粗调、细调及循环优化调节步骤进行。

3. 粗调

(1) 传输速度的设定

一般工厂可以根据生产速度的要求,确定一个最低的传送速度。降低传送速度可以增加再流焊接时间,降低钎焊温度,最终减少氧化。由于再流焊在生产线上不是最慢的环节,因此在可以接受的传送速度范围,应尽量选用低的传送速度。

如果从实际生产出发,考虑前后设备的衔接来确定导轨传输速度,或参考钎料膏推荐温度曲线来确定导轨传输速度,则速度为一个定值,不可调变:

$$V=L/t \quad (4.3)$$

式中, V 为网带运行速度; L 为炉体长度; t 为推荐温度曲线的总体时间。

(2) 温度模块数的划分

参考钎料膏推荐温度曲线,分析各阶段时间段,根据实际炉体模块数,确定各工艺阶段所需模块数并做分配。以 7 温区模块再流炉为例,一般 1、2 模块为预热阶段,3、4、5 模块为保温阶段,6、7 模块为钎焊阶段。

(3) 再流焊阶段参数的设定

这个阶段要严格控制,具体调节要根据实际情况和经验来设定。

确定再流焊时间 t_{reflow} :

$$t_{\text{reflow}}=L*\lambda/V \quad (4.4)$$

式中, λ 是考虑爬升区和冷却区对再流区长度影响的系数。

确定最低再流焊温度 T_{ut} :

$$T_{\text{ut}}=q/(\alpha t_{\text{reflow}})+T_{\text{m}} \quad (4.5)$$

式中, T_{m} 为钎料合金的熔点温度; q 为钎料的液化热; α 为再流焊设备对钎料的换热系数。

由于钎料的成分比较复杂,所以用上式计算的最低再流焊温度 T_{ut} 是近似值,精确的结果可以用实验的办法得到,或者要求供应商提供。

确定峰值温度 T_{pset} :

$$T_{\text{pset}}=T_{\text{ut}}+\Delta T \quad (4.6)$$

式中, $\Delta T=(T_{\text{max}}-T_{\text{min}})/2$, 为温度波动范围。

检查峰值钎焊温度 T_{pset} 是否超过了 PCB 和元器件能承受的最高温度,如果超温,表明需要进一步提高 PCB 的传送速度;如果峰值钎焊温度 T_{pset} 与 PCB 和元器件能承受的最高温度相差较大,则表明还可以进一步降低 PCB 的传送速度,然后重新开始设定。如果 PCB 的传送速度已经不能降低,表明该设备不能满足相应无铅钎料的生产要求。

(4) 预热阶段参数设定

确定预热温度 $T_{\text{preheatset}}$:



$$T_{\text{preheatset}} = T_{\text{pset}} - \Delta T_{\text{rise}} \quad (4.7)$$

式中, ΔT_{rise} 为温度爬升区的温度爬升能力。

确定预热时间 t_{preheat} :

$$t_{\text{preheat}} = L_{\text{preheat}} * \lambda_{\text{preheat}} / V \quad (4.8)$$

式中, L_{preheat} 是预热区的长度; λ_{preheat} 是考虑爬升区和进口升温段对预热区长度影响的系数; V 是传送带(链条)速度。

检查设定预热温度和预热时间, 如果引起助焊剂过度挥发或合金过度氧化, 则需加快 PCB 的传送速度, 然后重新开始设定。如果加快 PCB 的传送速度会导致峰值钎焊温度 T_{pset} 未超过 PCB 和元器件能承受的最高温度, 也表明该设备不能满足相应无铅钎料的生产要求。

4. 细调

待各设定参数运行稳定之后, 利用 K 型热电偶测温线调试 PCB 上若干点(至少 3 个点)的温度曲线, 与推荐温度曲线对比, 如果不合格, 参考推荐曲线, 对各参数(主要是温度, 有时也要微调网带速度)做适当调整, 采用多退少补的原则; 也可根据两次以上的测定值, 利用线形插值法求出目标温度对应的设定值。

另一种方法就是利用软件中提供的温度曲线仿真功能, 对曲线进行仿真调节, 模拟出与推荐曲线相符的温度曲线, 记录下模拟数据, 然后用此数据去替换上一次的设定数据。此方法推荐使用。

5. 循环优化调节

加热—参数运行稳定—调试温度曲线—细调, 以此循环, 调制出合格的温度曲线。一般经过 4 次循环就可以调制出理想的温度曲线。

4.3 再流焊接传热技术

根据再流焊接热源及加热方式不同, 再流焊接可分为红外再流焊、强制热风对流再流焊、汽相再流焊、激光再流焊等。表 4.4 为再流焊接不同加热方式的对比, 目前最流行的是强制热风对流再流焊接技术。基于上述加热方式, 其热量传输主要有三种途径: 辐射(radiation)、对流(convection)和传导(conduction)。

表 4.4 再流焊接典型加热方式的对比

热源	原理	优点	缺点	应用
红外辐射	红外线辐射加热	加热效率高, 节能且运行费用低, 处理能力大	存在遮蔽效应 存在色敏感性 加热不均匀	组装要求不高
热风	加热空气并通过强制热风对流加热	PCB 复杂程度较高 运行费用适中	热风气流一定程度影响焊接质量	广泛



续表

热源	原理	优点	缺点	应用
红外辐射+强制热风	红外线辐射热 强制热风对流	PCB 复杂程度高 处理能力广泛	由于材料的吸热差异导致设定温度困难, 需要进一步优化	具有发展前景
汽相 (VPS)	将 PCB 放入惰性液体饱和和蒸汽相中利用其汽化潜热	蒸汽可达每个角落, 热传导均匀, 温度精确, 处理能力大	价格昂贵, 生产成本低, 操作不当会有有毒气体排出	成批生产, 特殊场合
激光	用高能密度激光照射焊接部位实现焊接	对元件主体无影响, 适合精细焊接 灵活方便	处理能力小 运行费用高	高可靠性场合

4.3.1 热传导

物体各部分之间仅靠分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动引起的热量传递称为热传导。只要温度大于热力学温度 0K, 物体便有热运动的本领。热传导一般发生在固体和静止的液体中。

热传导时, 物体内的热量传递规律由傅里叶定律给出:

$$d\phi = -\lambda \cdot dA \cdot \frac{\partial T}{\partial n} n \quad (4.9)$$

通常, 将单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度, 即

$$q = \frac{d\phi}{dA} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} n \quad (4.10)$$

式中, λ 为物体的热导率, 也称导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

傅里叶定律表明: 温度梯度是引起物体内部和物体之间热量传递的根本原因, 同时也表明热流量的大小与材料的热导率成正比。热导率 λ 是材料的一个固有物理属性, 表示单位时间内, 单位温度梯度作用下物体单位截面所通过的热流量, 数值上等于温度梯度为 1K/m 时的热流密度。表 4.5 为常见材料的热导率。

表 4.5 常见材料的热导率

材料种类	λ	材料种类	λ
钎料合金	20~50	干空气	0.026
纯铝	220	环氧玻璃布板	0.2~1.7
纯铜	399	水	0.6
银	420	陶瓷	35~60

一旦确定了物体中的温度梯度, 就可以由傅里叶定律求得该点处的热流量。对于一维稳态温度场, 任一截面的热流密度为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4.11)$$

将上式中的 x 由 0 到 δ 积分, 得到通过平板的热流密度:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (4.12)$$



焊接加热时,组件焊区的温度场是一种非稳态温度场。但从稳态热传导公式可看出:热导率高的基材升温较快;薄板的温升速率要大于厚板;焊区大小不同时将导致各焊区出现较大温差。因此,这种传热的效果不佳。

4.3.2 热辐射

温度高于绝对零度的物体都会以电磁波的形式向外界发射能量,这一现象称为辐射,电磁波所具有的能量称为辐射能。

辐射是电磁波传递能量的现象。按照产生电磁波的原因可以得到不同的电磁波。例如,无线电波就是一种由高频振荡电路产生的电磁波,而热辐射是由物体内部微观粒子的热运动状态改变所激发出来的一种电磁波。

理论上,物体热辐射的电磁波长可包括整个波谱,但温度在 2000K 下的工业应用中,有实际意义的热辐射波长主要位于 $0.75\sim 1000\mu\text{m}$ 之间,而且大部分能量位于红外区段的 $0.75\sim 20\mu\text{m}$ 的范围内,而在可见光 $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 范围内的电磁波所具有的能量并不大。

热辐射是以电磁波形式进行的,与光传播类似,即在物体表面反射、吸收和穿透。但通常认为,热辐射的发射和吸收是在物体表面进行的,固体和液体对热辐射的发射和吸收仅在表面下的极短距离完成。对于金属体,这一距离只有 $1\mu\text{m}$ 数量级;对于大多数非导电材料,这一距离也小于 1mm ,因此可认为热辐射不能穿透一般物体(薄板例外)。

实际物体的辐射和吸收能力都小于同温度下的黑体(一种理想化的模型),物体的辐射热流量 Φ 可由斯蒂芬-玻尔兹曼定律表示:

$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (4.13)$$

式中, A 为物体的表面积; ε 为物体的辐射率,也称黑度,介于 $0\sim 1$; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)常数,也称黑体辐射常数,值为 $5.669\times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; T 为物体的温度,单位为 K 。

实际物体自身向外辐射热流量的同时,还吸收其他物体的辐射能,因此物体的辐射热流量是其辐射及吸收热量的总和。设辐射源表面积为 A_1 、表面温度为 T_1 、辐射率为 ε_1 ,被加热物体表面温度为 T_2 ,形态系数为 F_{12} ,则物体间的辐射热流量 Φ 可按下式计算:

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.14)$$

式(4.14)表明,物体的辐射率、表面状况和表面积都是传热量的影响因素。也可看出,辐射传热有较高的加热效率,但需精确控制温度变化,而且易出现较大的温度偏差。

4.3.3 热对流

热对流是由于流体(液体和气体)温度不同的部分之间发生宏观运动而引起的热量传递现象,同时伴随热传导现象。

对流体传热的基本计算公式是牛顿冷却公式:设流体温度为 T_w ,固体表面温度为 T_f ,两相接触面积为 A ,则流体和固体表面之间的对流传热量 Φ 可表示为

$$\Phi = hA \cdot \Delta T = hA(T_w - T_f) \quad (\text{加热时}) \quad (4.15)$$



$$\Phi = hA \cdot \Delta T = hA(T_f - T_w) \quad (\text{冷却时}) \quad (4.16)$$

式中, h 为表面传热系数, 也称对流换热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 表示流体与固体表面温差为 1°C 时, 1m^2 面积上每秒所能传递的热量。常见材料的传热系数: 空气强制对流为 $50 \sim 100$, 水强制对流为 $1000 \sim 15\,000$, 水蒸气凝结为 $5000 \sim 25\,000$, 液体流动的钎料为 $10\,000 \sim 20\,000$ 。

h 与 λ 不同, h 是一个过程量, 其大小取决于换热过程的许多因素, 如流动的起因 (自然对流和强制对流)、流体运动状态 (层流与湍流)、流体有无相变 (汽相焊)、流体的物性 (密度、运动黏度、热导率、热膨胀系数和比热容等) 及换热面的几何状况、尺寸及粗糙度等。

在实际应用中, 为了达到最为理想的加热效果, 需要将红外辐射和空气对流这两种加热方式有机地结合在一起。

4.4 红外再流焊接技术

4.4.1 红外再流焊接加热原理

顾名思义, 红外再流焊接是指利用红外线辐射能加热实现表面贴装元件与 PCB 之间的连接。红外线辐射能直接穿透到钎料合金内部被其分子结构所吸收, 吸收的能量会使局部温度增高, 导致钎料合金熔化。

4.4.2 红外再流焊接技术特点

任何一个红外系统, 其实际传热过程都不是单一模式, 而是包括辐射和对流在内将能量传递到被焊组件上。红外线是一种电磁波, 其波长在 $0.75 \sim 10\mu\text{m}$ 之间。其中大于 $2.7\mu\text{m}$ 的称为远红外, 小于 $2.7\mu\text{m}$ 的称为近红外。用近红外加热时, 被焊组件吸收的所有热量几乎都是从红外辐射得到的, 对流成分不到 5%; 而用远红外加热时, 被焊组件吸收的全部热量中, 辐射只占 40%, 其余 60% 的热量通过对流得到。

红外再流焊接一般采用隧道加热炉, 热源以红外线辐射为主, 适用于流水线大批量生产。红外再流焊炉成本较低, 其缺点是会因表面颜色的深浅、材料的差异及与热源距离的远近导致元器件所吸收的热量有所不同, 且因阴影效应会导致元器件的温度不均匀。

图 4.7 为红外再流焊设备示意图, 它采用的红外线波长一般为 $1 \sim 5\mu\text{m}$, 主要有远红外再流焊 (波长为 $2.5 \sim 5\mu\text{m}$) 和近红外再流焊 (波长为 $0.75 \sim 2.7\mu\text{m}$) 两种。近红外辐射元件为灯源辐射体 (钨灯), 远红外辐射元件为面源板式辐射体。短波红外线辐射容易使 PCB 及小元件产生过热, 却有利于钎料膏均匀受热。长波红外线辐射可以加热环境空气, 热空气再加热组装件, 这称为自然对流加热, 它有助于实现均匀加热并减少焊点之间的温差。

红外辐射和其他两种传热方式 (传导和对流) 不同, 对流和传导是从物体表面向内传递热量, 而红外辐射是把能量直接加到物体内部的一定深度, 使物体内部和表面以接近相同的速率加热。由于红外辐射能量能深入物体内部, 因而可产生有利的热效应。能量若能到达物



体的一定深度,则可使受热更均匀,减小受热体的热应力。当然,辐射到物体上的红外能量的上述效应的程度与对象物体的性质、表面状态、温度及红外线的波长有关。

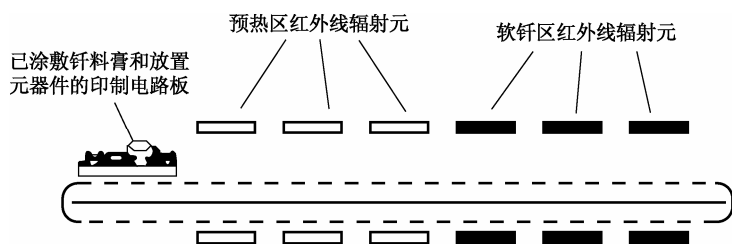


图 4.7 红外再流焊设备示意图

正是因为红外加热方式的上述不足,才促使强制热风对流方式的出现。由于气体是无处不在的,所以通过合理的空气动力学设计,空气对流产生的热风可以到达 PCBA 的各个角落,而且不同的元器件对这种热量的吸收程度的差异不大。

4.4.3 红外再流焊炉结构

对红外再流焊技术而言,焊接效果取决于红外热源。用于红外再流焊设备的典型热源主要有板式和灯式两种(见图 4.8),分别产生 $2.5\sim 5\mu\text{m}$ 和 $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 波长的辐射。板式红外热源结构有两种,它具有 800°C 的峰值温度,典型工作寿命为 $4000\sim 8000\text{h}$ 。灯式红外热源主要有 T-3 和 Ni-Cr 石英灯。T-3 的峰值温度为 2246°C , Ni-Cr 的峰值温度为 1100°C ,其中 Ni-Cr 石英管内不抽真空。

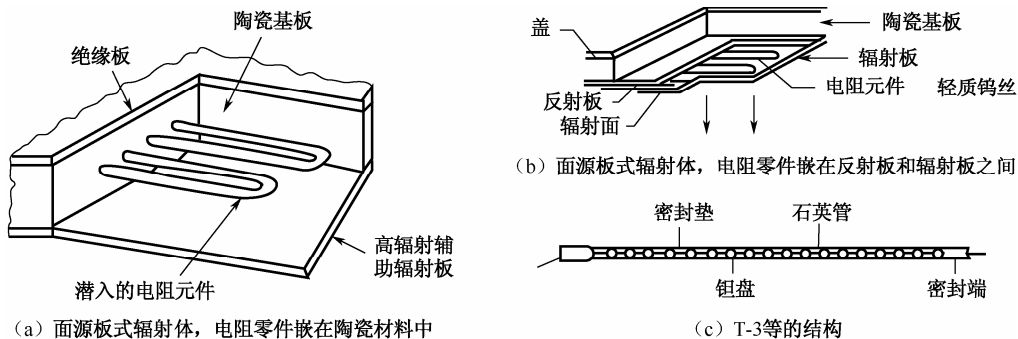


图 4.8 红外加热器

板式传递以对流为主,灯式传递以辐射为主,但系统的辐射/对流特性则取决于操作电压。在行业应用中,常根据所用红外线的种类和热传导方式的特点,将红外再流焊设备细分为近红外(见图 4.9)、远红外、空气循环远红外(见图 4.10)和远红外特种气氛 4 种再流焊设备。

红外再流焊接工艺需要控制的工艺参数主要有两个:红外辐射体的温度和传送机构的速度。随着这两个参数的变化,红外再流焊炉内的加热状态也会发生变化,从而可获得组件的不同加热温度曲线。正确控制加热温度曲线,使它符合特定要求,就可实现对组件的可靠钎焊操作。

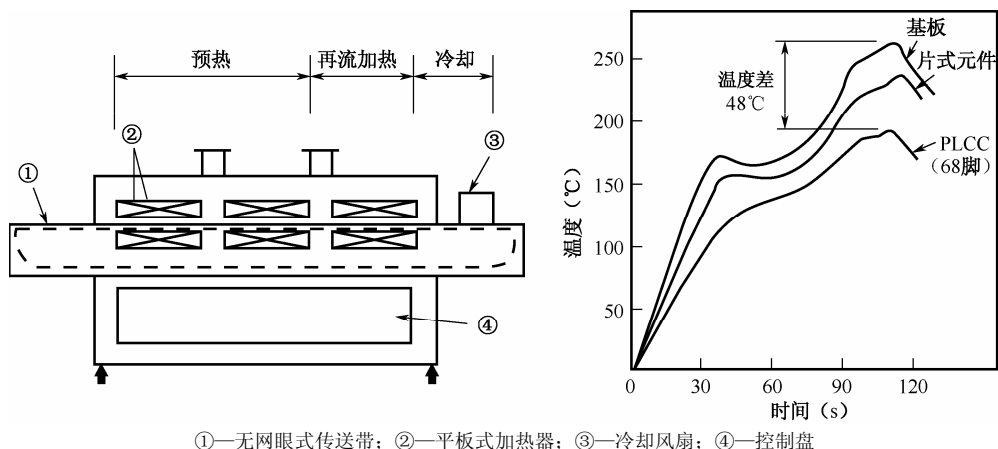


图 4.9 近红外再流焊钎焊设备

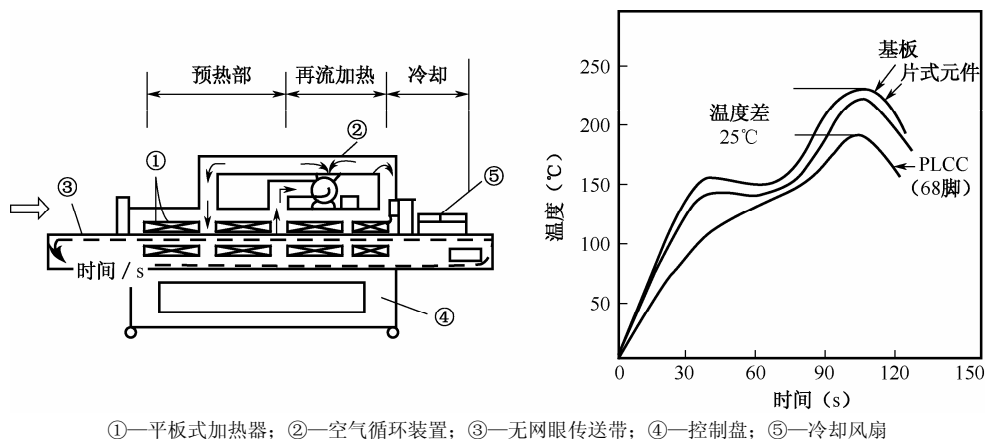


图 4.10 空气循环远红外钎焊设备

典型红外再流焊接工艺过程是将炉体分为多个区，在这些区域中对组件上下预热。以锡铅钎料为例，为使组件的局部区域热平衡及预先干燥钎料膏，预热温度一般为 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，在传热范围内，使焊接组件有时间进行温度平衡。随后焊剂熔化，进入第二温区，使焊接前组件温度达到 $150\sim 170^{\circ}\text{C}$ ，然后在再流焊区内完成焊接（温度应在 $210\sim 230^{\circ}\text{C}$ 之间），如图 4.11 所示。

红外再流焊焊接系统应用时需考虑以下几个因素。

- ① 横截面温度（即与钎料移动方向垂直的横截面上的温度）分布的均匀性。
- ② 工艺过程的稳定性（即系统温度状态不受负载的影响）。
- ③ 可调整性好（即通过简便调整，便可获得要求的焊接特性曲线）。
- ④ 传送系统形式（即指链传送或网带传送）及稳定性。
- ⑤ 中央支持系统结构精巧及使用方便，有效防薄型 PCB 加热变形。
- ⑥ 软件操作方便性等。

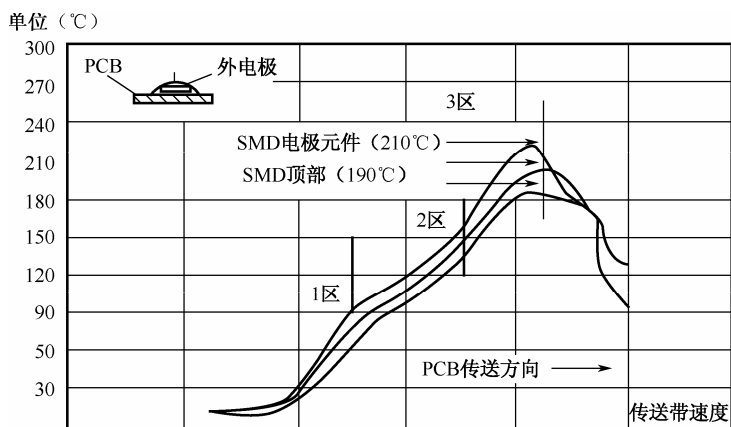


图 4.11 红外再流焊工艺曲线

4.5 热风再流焊接技术

4.5.1 热风再流焊接加热原理

为了适应 BGA、超窄间距 QFP、双面贴装 SMA 的工艺需要,近些年来开发成功了一种全热风再流焊炉。它用风机将被加热的气体从多喷嘴系统喷入炉腔,这种结构确保了工作区宽度范围内的温度分布均匀,能分别控制顶面和底面的热气流量和温度,实现在整个长度和宽度范围内温度分布的均匀性。在冷却 SMA 底面时,同时焊接 SMA 的顶面,实现了 SMA 双面再流焊接的目的,避免了已焊面上的焊点再熔化而使元器件掉下来。

目前流行的热风再流焊炉常指强制热风对流再流焊炉,是一种通过耐热风机与对流喷嘴结构来迫使气流循环流动,实现对被焊件均匀加热的再流焊接方法。该类设备自 20 世纪 90 年代开始兴起,由于此种加热方式的 PCB 基板和元器件的温度接近给定的加热区的气体温度,克服了红外再流焊接的温差和遮蔽效应,同时加热元件被封闭在组件内,避免了加热元件对元器件和 PCBA 的不良影响(见图 4.12),故目前应用较广。

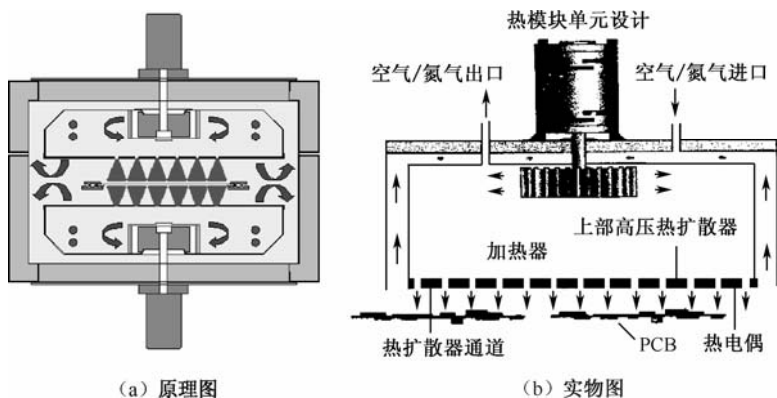


图 4.12 热风再流焊模块结构设计



4.5.2 热风再流焊接技术特点

热风再流焊炉除温度均匀性能优越外，目前很多强制热风对流加热模块还可分别控制上下温区的热风回流量和温度，可方便实现双面再流焊接工艺，并有效解决“芯吸”缺陷。

热风再流焊炉加热模块中循环气体的对流速度至关重要。为确保循环气体作用于 PCB 的任一区域，气流必须具有足够快的速度。这在一定程度上易造成 PCB 的抖动和元器件的移位。此外，采用此种加热方式就热交换方式而言，效率较差，耗电较多。

热风再流焊接技术改善了加热的均匀性，对于较复杂的组件，可用强制对流焊取代红外焊，以降低电子组件上的受热和色敏影响。但这种技术会加速钎料膏氧化，一般建议设备内充入氮气，这样可防止氧化，减少焊珠的飞溅，提高焊接的质量。

在热风再流焊接工艺方面，影响焊点质量的因素很多，主要包括设备、方法、材料、环境和操作者技能等，而设备的温度曲线设置对再流焊接质量而言尤为重要，图4.13 给出了再流焊接质量与温度曲线调试之间的关系，表 4.6 给出了温度曲线不同阶段可能出现的焊接质量问题。

表 4.6 再流焊接质量影响因素

焊点不良	可能的原因
元器件开裂	预热阶段加热温升斜率过高
钎料球	再流焊前不正确地预热、浸泡、活化
冷焊	不充足的熔点以上加热时间
钎料没有在引线处充分润湿	活化时间过长或焊接时间过长
钎料没有在焊盘处充分润湿	引线升温过快
立碑现象	预热温度过低
元器件烧毁	焊接温度过高

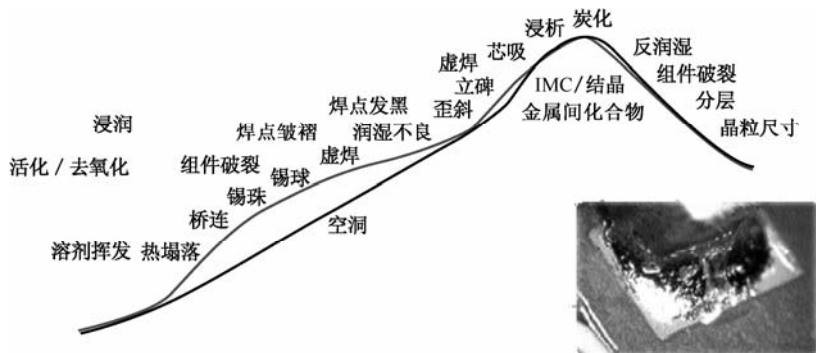


图 4.13 再流焊温度曲线与焊接缺陷对应关系

4.5.3 热风再流焊炉结构

目前，常见的再流焊炉均是隧道式，总体结构主要分为加热区、冷却区、气体控制系统（炉内气体循环装置、废气排放装置）及 PCB 传送四大主体部分，如图 4.14 所示。当然，随



着加热方式的不同，其组成结构也会有所不同。

热风再流焊炉的核心系统为热风加热模块，单模块结构从气流流速控制上来看，可分为自然对流与强制对流（静压控制）。强制对流相对于自然对流，可大大提高热传导率（见图4.15）。

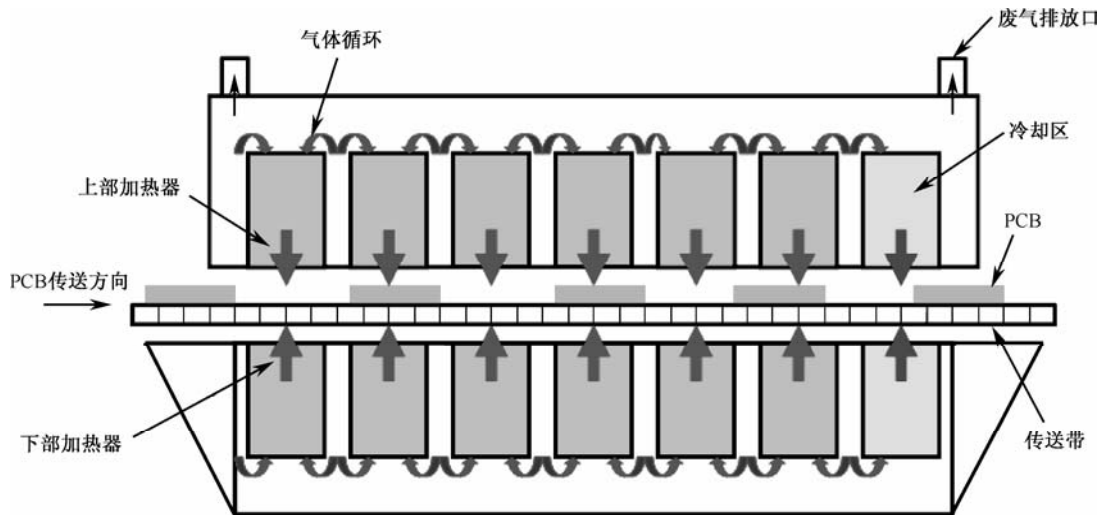


图 4.14 隧道式再流焊炉结构

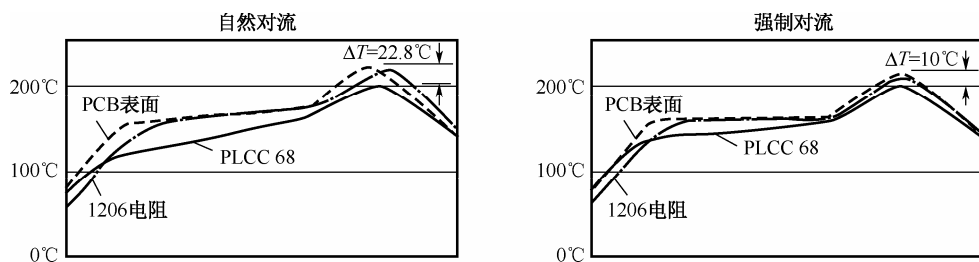


图 4.15 自然对流与强制对流温度曲线的对比

尽管增加热风流速有助于达到更好的温度均匀性，但是在实际设计中热风流速不能过大，以免吹动尚未焊接的元器件造成其位置偏移。为了进一步提高热传输效率，需要改进热风的流动方式。图4.16和表4.7给出了常见热风流动方式的热传输效率的对比，可以看出，多喷嘴结构具有很高的热传输效率。工业界也多以后两种结构为主，考虑到整模块垂直型流动方式设备结构简单，成本较低，因此市场上逐渐成为主流，其实物结构如图4.17所示。

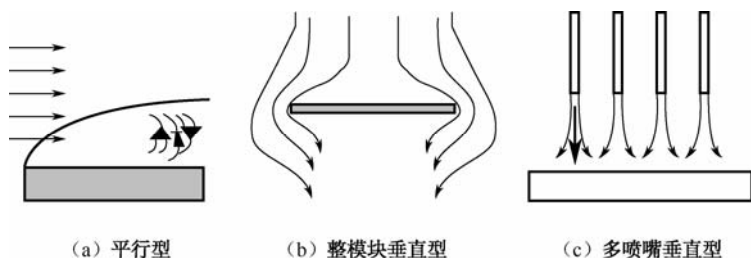


图 4.16 几种热风流动方式示意图



表 4.7 几种热风流动方式的热传输效率对比

	(a)	(b)	(c)
热传输效率 (W/m^2) 板面温度为 200°C , 热风温度为 250°C	1560	2175	6500



(a) 小循环热风对流



(b) 微循环热风对流

图 4.17 热风再流焊炉加热模块结构

热风再流焊炉具有下列特征。

- ① 加热器寿命长, 不易被助焊剂污染而导致性能劣化, 因而维修性能好。
- ② 温度控制的对象是位于 PCB 基板上、下附近的热空气温度, 因此基板和元器件比较安全。
- ③ 不存在远红外线加热时助焊剂的过热现象, 因而气孔少, 润湿性能好, 焊接效果得到改善。

④ 不存在元器件因外表色差对辐射的反射与吸收差异, 因此元器件间的温度差小。

⑤ 特别适合像 PLCC 之类的从底部引线的器件、线圈等, 可进行立体化再流焊接。

热风再流焊炉除上述优点外, 也存在以下一些不足。

① 影响风速分布的整流网结构复杂。

② 热传输性比远红外线差, 因而生产效率不如远红外线加热方式高。

③ 由于热传输性小, 因而受元器件体积大小的影响, 各元器件间的升温速率的差异变大。因此, 作为大的像 QFP 器件的焊接温度, 相对于体积小的 DIP 及片状元件来说, 就可能接近最大极限温度。

4.6 红外+热风复合加热再流焊接技术

4.6.1 红外+热风复合加热再流焊接加热原理

随着 SMA 组装密度的提高和 PLCC、BGA 等的广泛应用, 强制热风对流方式已经不能满足新工艺的要求, 工业上出现了一种把热风对流加热和远红外加热组合在一起的再流焊接系统。它是以远红外辐射对流传热为基础, 通过强制热风对流对产品进行加热的一种方式,



它有效结合了两者的长处，充分利用了红外辐射（暗红外波长为 $2\sim 8\mu\text{m}$ ）穿透力强、热效率高、节能的特点，弥补了强制热风对气体流速要求过快而影响焊接质量的缺点，同时有效降低了红外辐射的遮蔽效应和色敏感性。由于强力热空气循环导致 SMA 上方高温区的温度下降，低温区的温度上升而使炉腔内的温度变得均匀，因而目前已成为再流焊接工艺中的主流技术。

4.6.2 红外+热风复合加热再流焊接技术特点

随着细间距组装要求和 POP 等新型元件的应用，对再流焊设备的加热性能提出了更高的要求。强制热风+红外辐射单独调控的新型加热方式以其独特的优势将成为今后再流设备的主要发展趋势。

远红外+热风进行再流焊接的优点是：炉内温度分布的均匀性容易实现；热传导性能好，适用于大批量生产运行；由于远红外线能对 PCB、元器件内部同时进行加热，所以不同元器件间的温差小。

Masahito Nozue 等人对“强制热风”和“强制热风+红外辐射”两种加热方式进行了比较，实验结果如图 4.18 所示。由图可见，热风加热很难把元件与焊点的温差控制在 10°C 内，而热风+红外方式相比较而言更容易一些。因此，新型的再流焊设备大多采用大面积红外板上开有多个热风喷孔的加热结构。

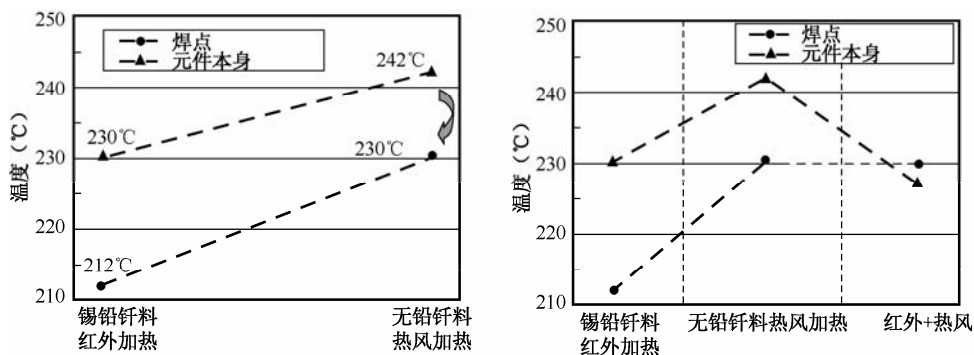


图 4.18 两种加热模式下元件与焊点的温度差

4.6.3 红外+热风复合加热再流焊炉结构

这种复合式再流焊炉的总体结构示意图如图 4.19 所示，可为上下组合结构，也可在单模组上实现热风+红外复合。

红外+热风单模组复合结构加热区的配置和传热示意如图 4.20 所示。此处的远红外线加热方式可区别为主动式或被动式，对于主动式加热，还可单独控制各自的热效率输出。

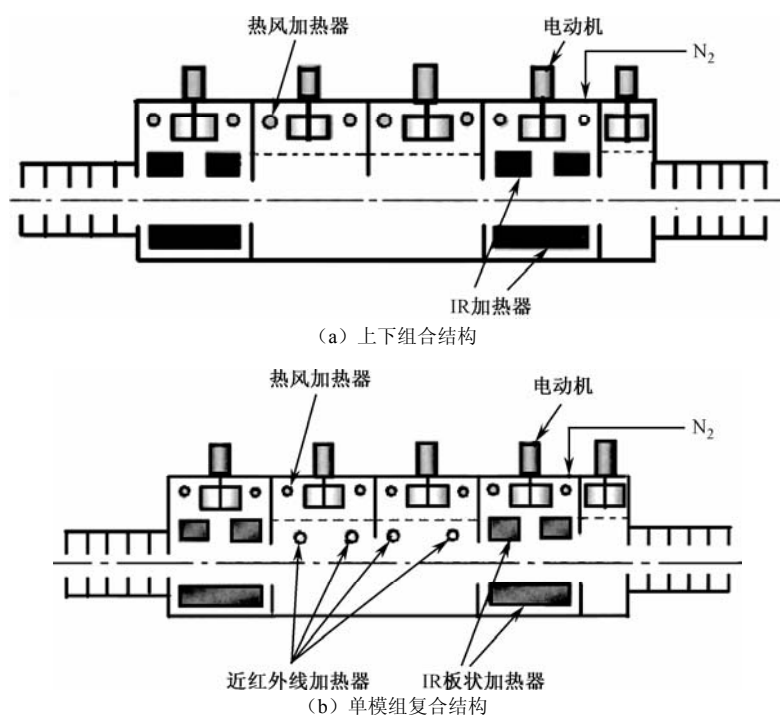


图 4.19 红外+热风复合加热再流炉的总体结构示意图

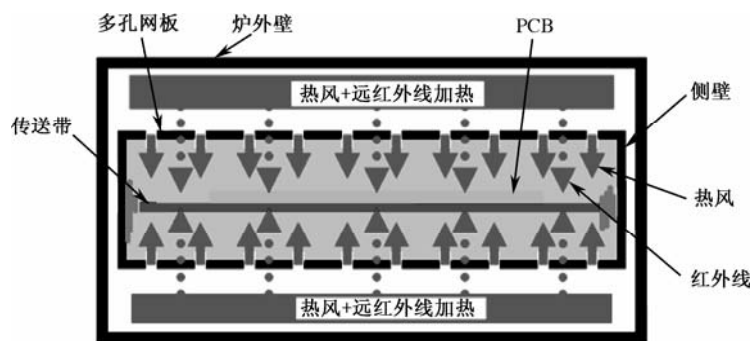


图 4.20 红外+热风单模组复合结构示意图

4.7 汽相再流焊接技术 (VPS)

汽相再流焊接 (Vapor Phase Soldering, VPS) 也称饱和蒸汽再流焊接, 是由维斯坦电气公司 (Westen Electric) 周继跃于 1974 年研制出来。与此同时, 美国 HTC 等公司开发了各类钎焊设备, 3M 等公司研制出多钟工作液, Alpha 等公司推出了多种汽相再流焊用钎料膏, 到 1977 年汽相再流焊接正式成为商业上可行的一种钎焊方法。随后, 西欧、日本也对其日益重视起来。特别是日本, 1983 年以后发展很快, 新的设备, 工作液、钎料膏及应用技术层出不穷。1986 年, 日本某些杂志甚至宣称: 1986 年为日本的 VPS 年。



我国从1984年由电子部14所率先研究汽相再流焊接技术以来,其发展也是十分迅猛的。1988年,机电部组织有关专家在14所就汽相再流焊接的工艺、机理、材料、设备等进行了鉴定,得到了满意的结论(该项目获机电部科技进步一等奖,国家三等奖)。随着电子组装技术的发展、组装要求的提高,汽相再流焊接也将占有一席之地。

4.7.1 汽相再流焊接加热原理

在大气压力下,加热某种工作液体使之沸腾,产生温度等于沸点的高温蒸汽,当温度较低的物体放入饱和蒸汽区之后,高温蒸汽向该物体表面凝集,放出汽化潜热,使物体升温。当物体温度达到液体的沸点即饱和蒸汽的温度时,此凝集和放热过程才结束。汽相再流焊接的简单工作原理就是利用这种靠饱和蒸汽为传热介质,用汽化潜热来加热物体,从而达到电子组件或机械零件钎焊的目的,这种相变方式,与简单的导热、对流和辐射相比,具有相当高的热传导率,主要表现在以下方面。

① 凝聚传热速率很高,在相同的热源温度下,汽相加热的速度快,一般组件的钎焊时间仅需5~20s,即使重34kg的巨大多层PCB也只需40s,从而大大减少了钎料与被焊金属的相互作用,使厚膜混合集成电路,特别是薄膜电路的钎焊性能大大改善。汽相再流焊接可减少或防止严重的“吃金”现象,为金厚、薄膜电路的钎焊提供了一个成功的途径。

② 在常压下,饱和蒸汽的温度与液体的沸点相同,因此加热的最高温度被严格地控制在工作液的沸点,不受零件大小、几何形状、加热时间和输入热功率的影响。这对于温度很敏感的电子元器件说来是很重要的。

③ 选择的工作液体是一种物理和化学性质很稳定的化合物,即使在高温蒸汽时也不会腐蚀电子元件,相反还有保护作用。钎焊环境清洁,焊后不留有害的残留物。

④ 饱和蒸汽的可达性好,无论多么复杂的零件,或多么复杂的焊缝,都可以均匀加热升温,这是其他任何钎焊方法不具备的。

⑤ 一些汽相再流焊设备具有观察窗,有些还是全透明的,可以观察整个钎焊过程,对研究、掌握钎焊全过程特别有利。

汽相再流焊用的工作液,一般为氟氯烷系溶剂产品(典型牌号为FC-70),俗称“氟油”,此类氟惰性液体的沸点都高于钎料的熔点,因此可以获得适当的再流焊温度。汽相再流焊时,将PCB放在吊篮中从顶部经过辅助蒸汽区进入主蒸汽区,辅助蒸汽是由氟利昂TE(B.P.~48℃)经加热后产生的,主蒸汽是由惰性的氟碳化合物(如Fe-70、Fe-5311)经过加热产生的,沸点为215℃。当被焊组件进入主蒸汽区后,蒸汽冷凝释放潜热形成连续的液膜覆盖在器件表面,此时部件表面热传递的速率为

$$Q=hA(T_v-T_s) \quad (4.17)$$

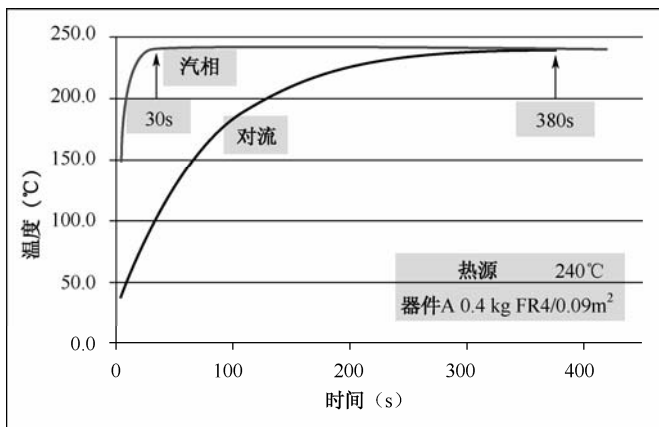
式中, Q 为从蒸汽到部件的热传递速率(J/s); h 为传热系数[J/(s·mm²·℃)],由液体凝聚物的热导率、黏度和密度及部件的表面(垂直、水平或倾斜)等因素决定; T_v 为饱和蒸汽温度(℃); T_s 为部件表面温度(℃); A 为部件的表面积(mm²)。



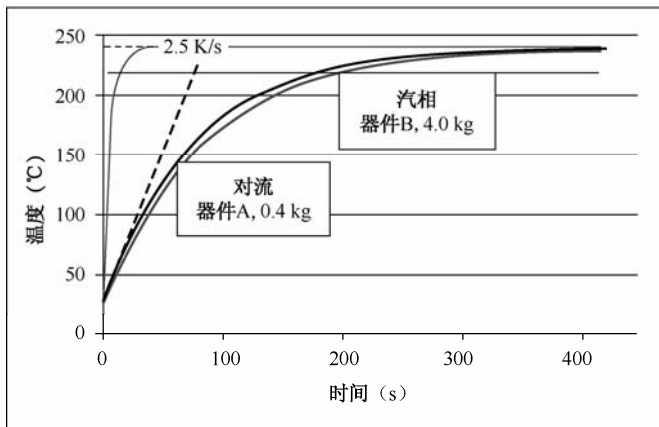
4.7.2 汽相再流焊接技术特点

以 Sn-Pb 为例,典型的汽相再流焊曲线升温较快,最初的加热速率约为 $6.7^{\circ}\text{C}/\text{s}$,逐渐趋于平衡、达平衡 (215°C) 时间约 25s,钎焊时间 ($183\sim 215^{\circ}\text{C}$) 约 18s。理论上,饱和蒸汽区内的所有物体应该同时被均匀加热,但实际上冷凝—传热过程在物体表面进行,因此物体本身的加热情况与物体的比热、质量的表面积有关。汽相再流焊时,基板、引线、器件间的温度也存在细微差别,各点达到平衡 (215°C) 的时间仅为 30s,达到 183°C 时各点相差仅为 2~3s。

图 4.21 中给出了同种元器件、不同再流焊方法达到相同温度所需时间对比和不同元器件在不同再流焊方法下的温度曲线升温斜率对比。汽相再流焊加热的最高温度由工作液的沸点所决定,各点间达到平衡 (最高温) 的时间稍有差异,但时间很短。而热风对流或红外再流焊则不同,加热主要靠空气对流及红外辐射,炉子结构、器材对能量的吸收率、路径、阻挡、热源预置温度等因素均会影响到加热情况 (加热曲线)。从理论上说,随着加热段的增加,温度曲线的设计可以是随意的,但实际上要获得理想曲线是不可能的。



(a) 同种元器件、不同再流焊方法达到相同温度所需时间对比



(b) 不同元器件在不同再流焊方法下的温度曲线升温斜率对比

图 4.21 热对流与汽相焊的温度曲线热效率对比



汽相再流焊接技术具有以下特点。

- ① 温度升高速度快，受热均匀并能精确控制最高温度，不会发生过热现象。
- ② 溶剂蒸汽可到达每一个角落，热传导均匀，可完成与产品几何形状无关的高质量钎焊。
- ③ 可以焊接 PLCC、QFP。
- ④ 溶剂价格昂贵，生产成本低。
- ⑤ 操作不当时，溶剂加热分解会产生有毒的氟化氢和异丁烯气体。
- ⑥ 升温条件不能由 SMD 的种类来确定，汽化力有将 SMD 浮起的可能，会产生“曼哈顿”现象和“芯吸”效应。
- ⑦ 蒸汽层在焊接器件提供了无氧气环境，从而提高了焊接质量和可靠性。
- ⑧ 汽相再流焊接与典型的 PCB 涂层相兼容，包括 HASL、OSP、ENIG、Im-Sn、Im-Ag。

4.7.3 汽相再流焊炉结构

图 4.22 为汽相再流焊炉工作原理，图 4.23 为汽相再流焊系统示意图。以锡铅焊接为例，部件在主蒸汽区内停留一段时间后，其温度达到主蒸汽的温度（215℃），此时，预先涂覆在焊点处的钎料膏已经熔化，并依靠表面张力的作用形成焊点，随后将部件提升回辅助蒸汽区。尽管由于主蒸汽区过热可以使辅助蒸汽的温度高于氟利昂 TE 的沸点，达到 85~107℃，但辅助蒸汽区的温度明显低于钎料的熔点（183℃），部件在辅助蒸汽区停留 30~60s 后，液态钎料凝固，形成焊点，同时部件上凝聚的液体也再流到汽相钎焊系统中去，此时取出部件，焊接过程就完成了。

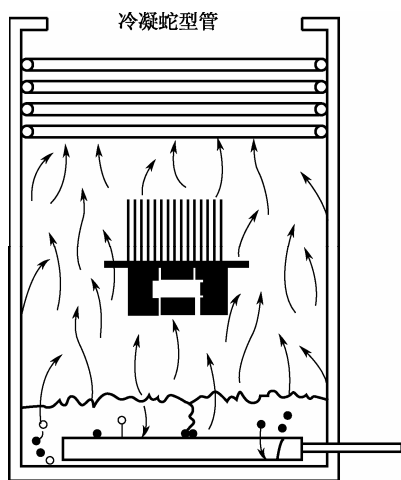


图 4.22 汽相再流焊炉工作原理

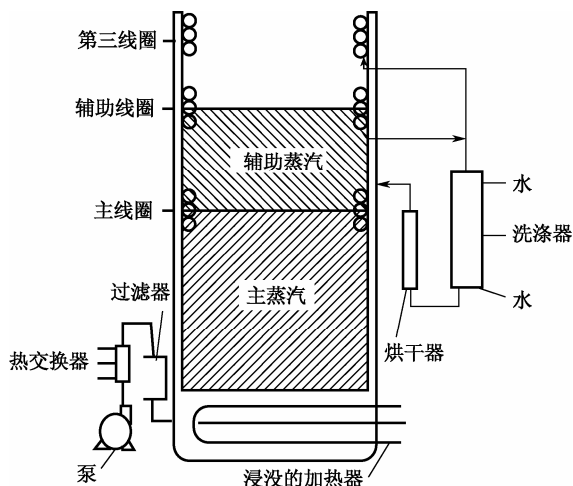


图 4.23 汽相再流焊系统示意图

由式（4.17）可以看出，在汽相焊过程中，只有最大表面加热速率和最高表面温度可以控制：当部件刚进入主蒸汽区时， T_s 很小，表面加速度最大；随着时间的延长，加热速度逐渐减小，表面温度不断升高。因此，可以在部件进入主蒸汽区之前对其进行预热来达到控制最大表面加热速率的目的。而元件的最高温度取决于在主蒸汽区内停留的时间，随着时间的延长， T_s 逐渐趋近于 T_v ，加热速度趋近于零。由此可见，部件所能达到的最高温度就是蒸汽的温度（215℃），因此，一般来说不存在温度过热的问题。



汽相再流焊工作液的“污染”是让用户头痛的一件事。针对此危害，工作液制造商与设备制造商都做了很多设计与改善，尽量避免“污染”的产生。另外，在工艺上也要严格执行除湿、除酸、过滤规定，防止在加热器表面沉积汽泡或污粒，造成局部热点。总之，合理地选择和使用（而不是随意地制造、使用）汽相再流焊机，汽相再流焊的污染问题是可以避免的，安全也是有保证的。

汽相再流焊的工作成本比较高也是令用户与制造商头痛的事。汽相再流焊工作成本高的主要原因是工作液的损耗，它主要由 3 部分组成：

① 蒸汽和空气界面上的密度梯度和温度梯度很大，冷凝器的凝集作用使 FC70 蒸汽横向流动，而热空气的上升造成垂直方向的热对流；FC70 蒸汽还会凝集在空气中的小水滴上形成 FC70 雾，结果造成 FC70 扩散损耗和对流损耗；

② 钎焊时 FC70 蒸汽在组体上冷凝—沸化形成动平衡，在组件表面会形成一层液态薄膜，若工艺处理不当，组件会带走部分 FC70；

③ 设备的传动部分（吊篮、传送链等）、组件的夹具、垫板等，也会带走部分 FC70。

汽相再流焊工作者多年来把减少 FC70 损耗作为关键技术研究，做了很多努力，主要包括以下几个方面。

① 采用最合理的工艺参数，包括加热功率（也有采用空载、负载不同功率的）、钎焊时间、工作环境（湿、酸度）等，确保蒸汽处于饱和状态，切忌蒸汽、空气混杂（混杂时耗损最大，因此开、关机时特别要注意），确保钎焊过程达到“动平衡”，保证焊件最终是“干”的。

② 尽量隔离钎焊蒸汽区与外界的联系，把传送部分为两部分：净传送部分、蒸汽区传送部分。

③ 加强工作液回收。

④ 在采用立式（batch type）设备时，用二次工作液（RF113）作为蒸汽罩防止一次工作液（FC70）逸出，可减少 90% 损耗。

通过这些工作，FC70 的损耗可以控制在一个较小的程度。在研究工作者的努力下，一些新的设备通过二次回收，成本还能大大降低，可以说，批量生产时，汽相再流焊的成本不应成为采用该技术的障碍。

4.8 再流焊炉设计参数及应用

再流焊炉的设计参数主要包括加热系统的热转换效率、热传导率、氮气保护能力、助焊剂等挥发物的管理能力、冷却能力、能源效率、传输系统的稳定性、有铅/无铅工艺温度曲线的兼容性、炉温调控能力等，具体要求将在 4.9.3 节中详述。

再流焊炉应用时需考虑以下几个因素。

① 温区。有铅再流焊炉根据不同产能的需求应具有（2~8）个独立控制区，对于小批量生产状况，温区数可靠近低端取值，而要求大产能时则应靠近高端取值；无铅再流焊炉根据不同产能的需求应具有（8~12）个独立控制区，对于小批量生产状况，温区数可靠近低端取值，而要求大产能时则应靠近高端取值。



② 炉内温度的波动量。再流焊炉连续工作时，应具有快速加热被焊元器件表面的能力以确保炉温稳定，炉温波动应小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

③ 炉内温度的均匀性。现代封装技术的发展，驱使再流焊接技术不断向微焊接技术逼近。因此，再流焊炉温度的不均匀性应 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ，只有这样才能满足微焊点的焊接质量要求。

④ 炉子排气量的选择。再流焊炉排风能力的选择，在不影响正常焊接工艺过程的前提下，还应充分考虑抵御外部恶劣气候环境影响的能力。

⑤ 控制系统的性能评测（各种保护及防呆设计等）及其他综合项目，包括 UPS 运行时间（ $\geq 20\text{min}$ ）、功耗（启动功率及运行功率）、升温时间、制程切换时间、废气排量（ $10\text{m}^3/\text{min}$ 左右）、机器外壳温度（ $\leq 40^{\circ}\text{C}$ ）及噪声（ $< 70\text{dB}$ ）等。

⑥ 安装场地要求。安装再流焊炉时应避免再流焊炉的出入口正对门窗或风源，以保证炉温稳定。

⑦ 防静电要求。再流炉应有完善的静电泄放能力，不会形成静电积累；同时，为防止设备运行时产生静电损坏元器件，设备的防静电接地不能和电网的地线混用。

4.9 无铅再流焊接工艺技术

电子整机行业的无铅化技术发展是国际信息产业工业发展的必然趋势，我国信息产业部也要求自 2006 年 7 月 1 日起，投放市场的国家重点监管目录内的电子产品不能富含 Pb。

4.9.1 无铅再流焊接工艺技术特点

当电子组装逐渐实现无铅化后，无铅钎料的高熔点、低润湿性给实际的焊接生产工艺带来了很大变化，其主要特点如下。

① 目前可用的无铅钎料（SnAg、SAC 等）的熔点比传统的 SnPb 钎料熔点高 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ （见图 4.24），因此无铅焊接需要较高的焊接温度。

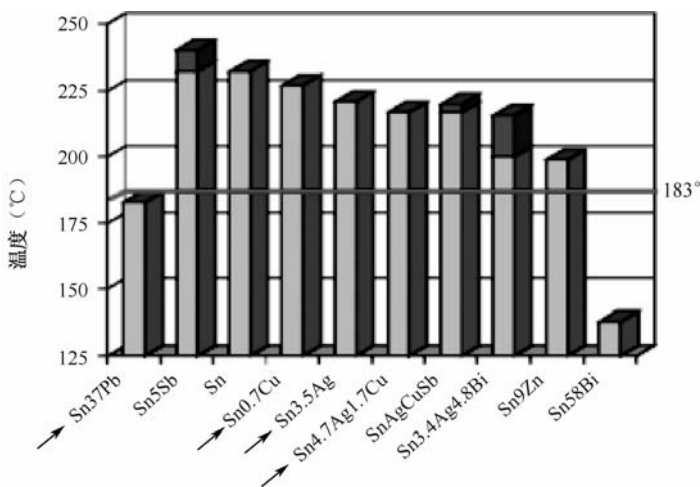


图 4.24 不同无铅钎料的熔点温度



② 无铅钎料的润湿性弱于传统的 SnPb 钎料（见图 4.25），同时从残渣腐蚀性的角度考虑，不能使用活性太强的助焊剂，因此无铅焊接可能需要较大的助焊剂使用量。

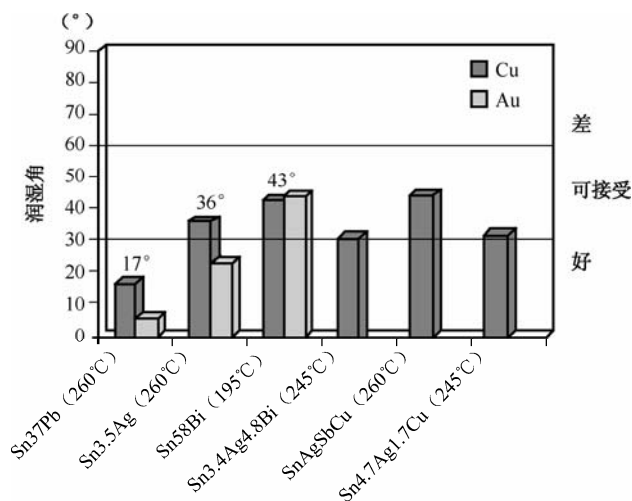


图 4.25 不同无铅钎料的润湿角

4.9.2 无铅化对再流焊接温度曲线的影响

表 4.8 给出了典型的有铅及无铅温度曲线工艺参数要求。无铅焊接温度曲线与传统共晶温度曲线（见图 4.26）相比较，预热区坡度变缓，焊接区温度升高。

表 4.8 再流焊温度曲线工艺参数

曲线特征		有铅曲线	无铅曲线
平均爬升斜率		最大 3℃/s	最大 3℃/s
预热	最低温度	100℃	150℃
	最高温度	150℃	200℃
	时间	60~120s	60~180s
液相线以上保留时间		60~150s (183℃)	60~150s (217℃)
峰值温度 (℃)		215	235~245
峰值温度保留时间 (波动 5℃)		10~30s	20~40s
下降斜率 (℃/s)		最大 6	最大 6
室温 25℃ 到峰值温度时间 (min)		最大 6	最大 8

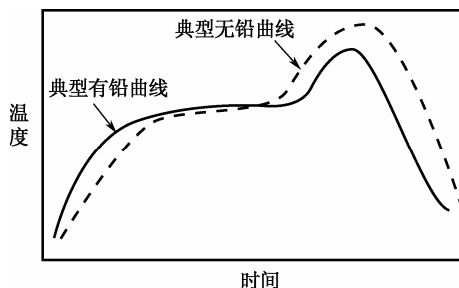


图 4.26 有铅与无铅典型再流焊接工艺曲线



在再流焊过程中, 采用的元器件和 PCB 并没有随着无铅化而发生改变, 其焊接可承受温度最大不能超过 240°C , 若超过这个温度, 就进入危险区, 将会导致缺陷的出现和元器件的损坏。无铅焊接温度的提高, 会造成焊接工艺窗口变窄 (见图 4.27), 只有 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

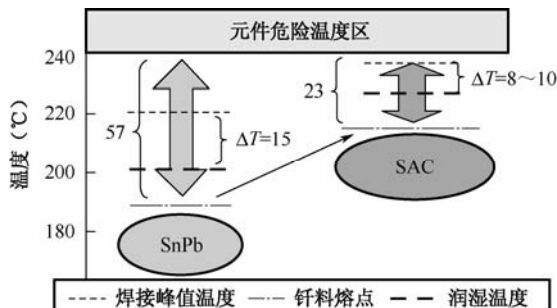


图 4.27 SnPb 共晶钎料与无铅钎料工艺窗口的比较

4.9.3 无铅化对再流焊炉的影响

无铅化组装给再流焊生产设备带来了新的挑战, 面对无铅钎料的高熔点、低润湿, 设备生产厂商应该对炉子的结构和性能进行新的设计和改进, 以满足无铅化焊接的要求。

1. 加热系统

(1) 上下两面同时加热, 提高热效率

对于传统共晶钎料, 由于焊接温度不高, 常采取单面加热或局部双面加热的方式。无铅化后焊接温度升高, 常用 SnAgCu 合金的熔点为 $217\sim 219^{\circ}\text{C}$, SnAg 合金的熔点为 221°C , 如果焊接温度为 240°C , 考虑到实际生产中 PCB 上的温度一般低于模块温度 10°C 左右, 故应该具有 250°C 以上的再流区加热能力。另外, 无铅化后工艺窗口变窄, 加上无铅钎料的非共晶特性, PCB 板面横向温差 ΔT 对焊接质量会造成很大的影响, 重负荷与轻负荷在同一位置的温度差别一般应控制在 5°C 之内。考虑到以上原因, 无铅化后应该采用上下两面同时加热的方式 (见图 4.28), 以增强加热能力, 提高加热效率。

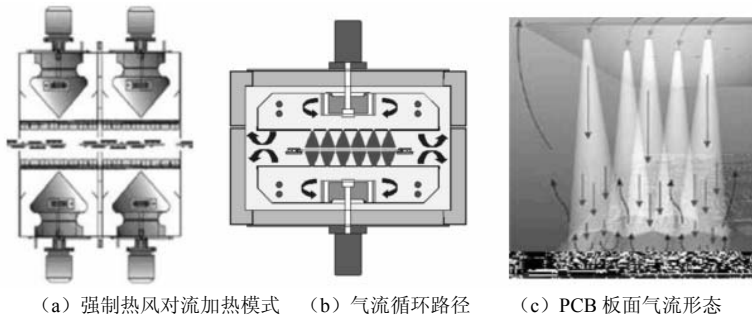


图 4.28 强制热风对流加热模式及气流循环路径流动示意图

(2) 提高温区之间的绝缘性

温度爬升能力是决定预热温度的关键因素, 温度爬升能力越大, 预热温度可以越低。当



再流区温度为 230°C 时, 预热温度设为 180°C , 接近有铅钎料的熔点, 已经是相当高的温度了。 50°C 的温度爬升能力是最起码的要求, 70°C 的温度爬升能力较好, 目前, 一些再流焊的温度爬升能力可达 100°C 。爬升能力低, 各温区之间容易串温, 会给工艺曲线的调整带来不便。高预热温度对焊接质量会造成不良的影响, 而且功率消耗量也大。良好的温区绝缘是提高温度爬升能力的最好方法, 这样热量就不会通过金属和气体传递, 而只通过导轨、PCB 和链条传递, 可以实现大爬升能力。

(3) 炉体加长, 减小导轨的热膨胀率

由于无铅合金的比热增大, 所以需要更长的预热时间(或提高加热效率)来提高预热温度, 减小快速升温对树脂基板和元器件的影响, 从而导致工艺时间变长; 另外, 由于无铅化后工艺窗口变窄, 要求平顶温度曲线, 而预热区到焊接区的温差又接近 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$, 单组加热模块作为再流区难以做到平顶的温度曲线, 因此双组加热模块作为再流区的设备优于单组加热模块作为再流区的设备。另外, 由于无铅钎料产品的多样性, 为了适应不同生产厂商的温度曲线要求, 应该增加温度曲线的柔性, 其中办法之一就是增加加热模块数。这样一来, 炉体加长, 对于运输导轨来说就不得不考虑热膨胀的影响。假设导轨长度为 5000mm 左右, 导轨用材为铝型材, 取热膨胀系数为 $235\times 10^{-5}\text{mm}/^{\circ}\text{C}$, 则在 240°C 焊接时的膨胀量将达几个毫米, 这样会导致导轨发生变形, 出现夹板或漏板现象, 因此无铅化后应采用热膨胀系数(CTE)更小的导轨材料, 或采取其他方式来防止热膨胀, 如炉子中不同温区的轨道之间用不锈钢栓连接, 这样既可以防止导轨变形, 也可以减小横截面, 减少不同温区之间的热传递。

(4) 最少加热模块数

对于双组加热模块作为再流区的设备, 结合日本电子信息技术工业协会(JEITA)和相关资料推荐的温度曲线参数, 我们取极限参数计算炉区的最少模块数, 结果为 7.78 个, 取整数为 8 个模块数。炉区最少模块计算原理图如图 4.29 所示。模块数越多, 曲线柔性越大, 越易调整温度曲线。由于钎料膏的种类不同, 参考标准就存在差异, 设备生产商应根据实际的技术要求对加热模块数进行调整。

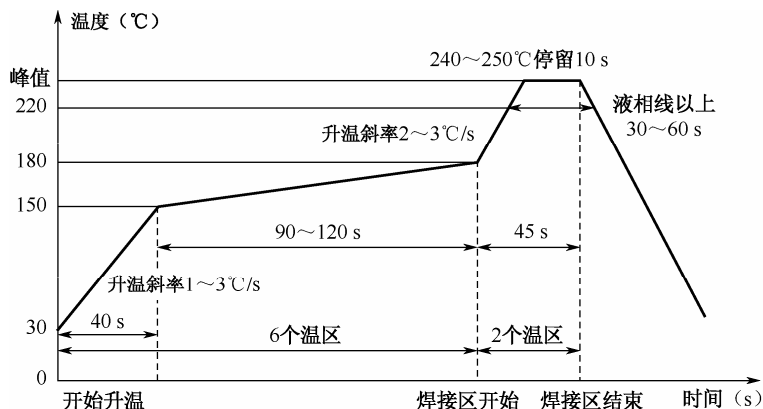


图 4.29 炉区最少模块计算原理图



(5) 采用高性能热风电动机

热风加热再流焊炉最大的问题就是热传导的效率低,最大不超过 19%。为了得到高的热传导效率,除了上述采用上下两面同时加热的方式外,循环气体的流速要求很快,PCB 表面的速度可达到 $1\sim 1.3\text{m/s}$ 左右或更高。但是速度不能太高,否则就容易吹走元器件,因此对于不同的厂商、不同的模块大小和喷嘴尺寸,风速都不一样,要经过严格的试验来设计和测量。大量气体被加热后快速流出加热模块,对焊接材料进行加热。对于设备而言,就需要大功率、高速旋转的热风电机,其最高耐热温度一般应达 350°C 。

2. 制程控制系统

伴随电子产品朝着轻小型、便携式方向发展,BGA 器件、细间距 QFP、微型阻容器件得到了大量使用,随之带动了高密度电子组装技术的发展。一块 PCB 上的元器件越来越多,焊点也越来越多,成本也越来越贵,如果一个焊点出现问题,就会导致整个电路板报废。无铅化后工艺窗口变窄,焊接质量对于温度曲线的依赖性很大,因此在一个很窄的窗口中控制气体温度是非常重要的。在实际生产中,可通过 PID 控制模块上的热电偶来实现对气体温度的控制。

在无铅焊接中严格控制制程参数成为保证焊接品质的重要手段。如果设备带有独立的制程参数监视统计系统,能对制程参数进行实时监视和统计分析,则可以大幅度提升对焊接工艺的监控能力,有效预防不良品的发生。

再流焊设备制造商越来越认识到炉子先进的温度曲线绘制能力与实际炉子控制软件结合的优点。这种曲线绘制软件和控制软件作为一个单元工作使系统具有自我绘制曲线的功能。

过程控制方式通常有 3 种:SPC、PWI 和能力指数 C_p 及 C_{pk} 。SPC 即统计过程控制 (Statistical Process Control),主要是指应用统计分析技术对生产过程进行实时监控,科学地区分出生产过程中产品质量的随机波动与异常波动,从而对生产过程的异常趋势提出预警,以便生产管理人员及时采取措施,消除异常,恢复过程的稳定,从而达到提高和控制质量的目的。SPC 作为一套监控变化的工具,是适用于 3-sigma (标准差) 能力或管理目标的工具。使用“能力指标” C_p 和 C_{pk} 指数来预测不良生产,比 SPC 技术更科学、准确和有效。通过对设备能力 C_p 和工艺能力 C_{pk} 的测量和计算,可以清楚地预测产品的品质水平;只要对其监控,就可以检查作业和预防不良品。但是由于其十分复杂和难以掌握,所以不能广泛地应用于实际生产中。PWI (Process Window Index) 是将工艺窗口的范围按 0 到 $\pm 100\%$ 来划分,然后对所设置的或所测量的某一特性根据它和工艺极限的相对数据距离,以百分比的方式表示出来 (见图 4.30)。PWI 容易理解和使用,而且计算简单,完全符合“瓶颈”理念,它的整体指标是由所有考虑因素中的最弱点来决定的。这 3 种控制方式不是单独使用的,生产中常根据不同的控制要求进行结合与选择。如果对产品要求在 4-sigma 水平之下,可以使用 SPC 技术,如果辅以 PWI,则更好;如果对产品要求在 4-sigma 到 5-sigma 之间,可减少 SPC 的依赖,以 PWI 为主,辅以 C_{pk} 技术;如果对产品要求在 5-sigma 以上,应该以 C_{pk} 为主,辅以 PWI 技术。

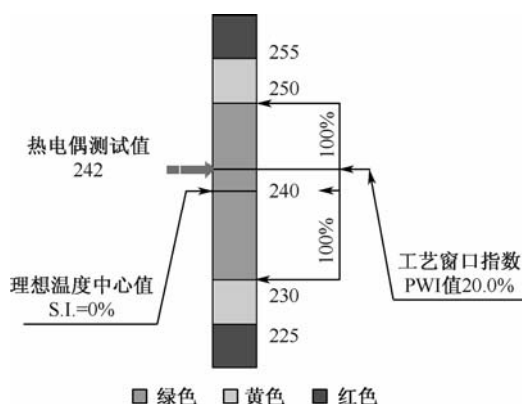


图 4.30 PWI 值定义

自动再流焊管理系统的基本功能是精确地自动检测和搜集通过炉子的产品数据,这种功能具有下列好处:减少工艺检验曲线的必要;提供实时反馈和报警以实现零缺陷;彻底地自动再流工艺数据搜集;提供自动的再流焊工艺 SPC 框图和基于工艺 C_{pk} 变动的能力。管理系统由硬件和软件组成,硬件包含两组固定在炉膛内的热电偶组,每组包含 15 个传感器(见

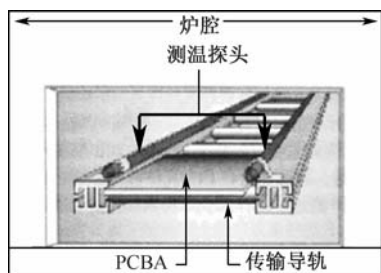


图 4.31 固定于左右两侧导轨的热电偶组

图 4.31),这两组热电偶沿着传送轨道均匀安装,外面是不锈钢保护套管,然后连接到热电偶处理器(TPU),TPU 再和控制计算机连接。热电偶有很高的可靠性和灵敏度,当 PCB 在炉子中通过时,气流温度的变化都会被传感器侦测到,然后通过 TPU 传送到计算机中进行数据处理分析。在制程的开发中首先要定义的是规格,即制程窗口。对再流焊制程来说,钎料膏和元器件及 PCB 等相关材料都有各自的使用规格,而制程窗口指数 PWI 是一个用统计工具来定义的制程规格,并可以评估实际规格的符合程度。SPC 系统可以设置从 KIC 系统中读取数据。对于影响焊接质量的众多因素,利用参数搜索引擎或 KIC 自动预测功能,可以判别种种设定,分析产品和温度曲线及 PWI,然后自动优化,在几十秒内找出落在制程窗口中心的参数设定,也即 PWI 的最小值。如图 4.30 所示,绿色代表允许规格范围,黄色代表超出允许规格范围,可以使用但有风险,红色代表禁止区。在实际生产中,可以选取绿色表示的数值,如图中选取的 PWI 值 20.0%。

炉子参数设定后,通过自动再流焊制程管理系统可以计算出炉子制造的每一片 PCB 的温度曲线及相应的 PWI 值,也可以计算出每一产品的实时 C_{pk} 值。这样,当 C_{pk} 不在预设水平时,系统就会发出警报。警报可以打开一个报警灯或停掉前段的输送带。

虚拟温度曲线使得我们可以记录并检验每片 PCB 的温度曲线,该曲线基于实际的 PCB 温度曲线和与此同时 30 个热电偶所采集的数据,两者之间建立起来的关联性使得软件能够通过 30 个热电偶的数据准确地模拟出 PCB 的温度曲线变化,如图 4.32 所示。

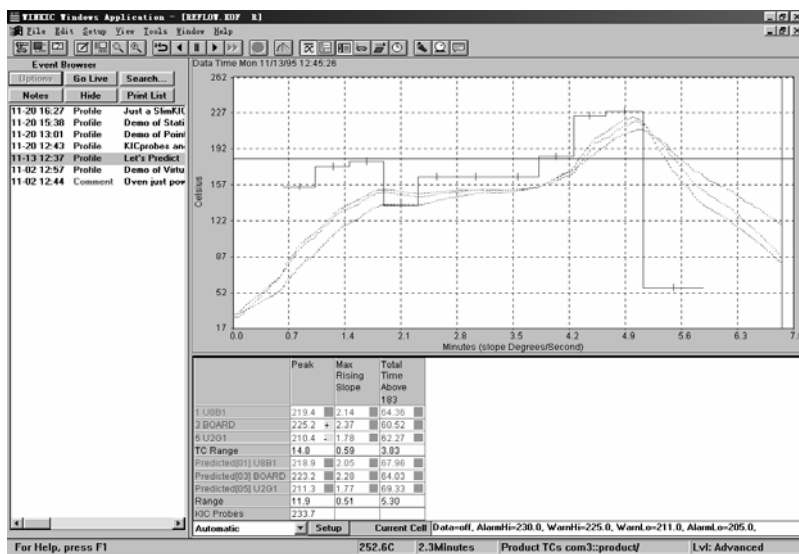


图 4.32 KIC 虚拟温度曲线功能

3. 助焊剂管理系统

无铅钎料中的助焊剂增多,高的制程温度导致助焊剂大量挥发,这些挥发的助焊剂如果得不到有效处理,将会污损机器,严重的还会污损生产中的 PCB,造成产品报废。另外,伴随无铅再流焊工艺中氮气的使用,在冷却区会造成更严重的助焊剂凝结。焊接过程中会产生大量水蒸气、有毒气体、灰尘、固体颗粒和一些液体,其主要来源见表 4.9。在再流焊过程中,会产生大量污垢,其中助焊剂中占 20%,其余都来自 PCB。SMT 通过测试得出:在再流焊过程中,一块 PCB 的质量约减少 0.3g,如果焊接 500 000 块板,就会产生 150kg 的污垢。

表 4.9 再流焊中产生的有害物质

	烟和水汽	固体颗粒	液体
PCB	树脂、溶剂	拓片、树脂、酸(晶体)	树脂残余、溶剂、酸
钎料膏	溶剂、助焊剂	—	助焊剂、溶剂、酸
元件	树脂、铸件混合物	拓片	溶剂

助焊剂处理主要包括以下三方面。

一是助焊剂蒸发系统。一些炉子提供定期的助焊剂蒸发系统,通过加热使助焊剂改性变成细颗粒灰尘并在没有副作用的情况下被清除掉。

二是助焊剂过滤系统。储备中预设了助焊剂的凝结位置,避免凝结的助焊剂滴落在 PCB 上,如图 4.33 所示。这种系统最主要的是控制循环气流,把通道和炉区里的污染物排出到层叠式绝缘管中而在此凝结,残留物可以通过更换廉价的过滤器而被清除,不会影响正常的生产。气体通过过滤器而去除大的颗粒,利用活性炭而过滤别的污染物,过滤后的气体直接到达排气系统或进入炉内气体循环系统。

三是无水冷却助焊剂回收系统。这种方法就是阻止助焊剂气流到冷却区,否则会造成冷却区凝结污染,也会腐蚀炉子单元,如图 4.34 所示。此系统不需要过滤器或冷凝器,大大减少了设备的维修,而且助焊剂气体、PCB 挥发物和空气中的污染物这些副产品被有效地管



理并且清除。在闭环系统中，富含助焊剂的气流从加热区转移，使用一种旋风系统凝结，助焊剂在炉体外面被收集。变凉的无助焊剂气流再被引入冷却区进行冷却。这套系统最关键的是每个温区的排气原理。炉体中的气体按一种独特方式循环，集中污染物可以通过一个标准的管道排出。当炉子保持一个稳定的纯惰性气体工艺环境时，污染物不能进入冷却模块。试验显示，安装这种系统的炉子的清洗率是不安装炉子清洗率的 1/8。

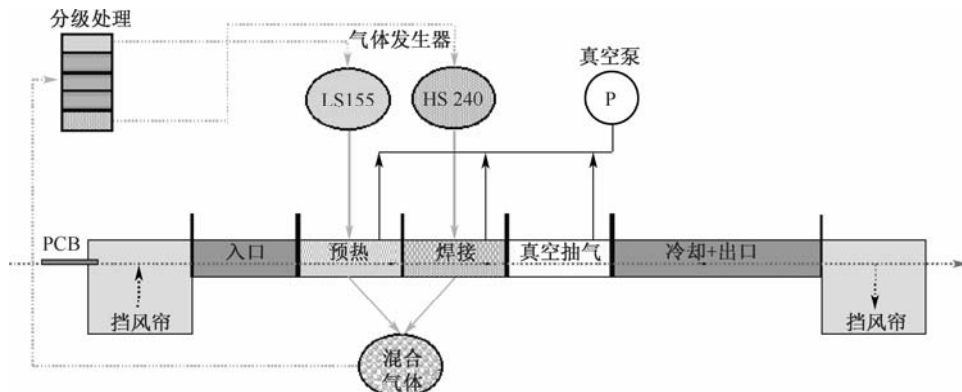


图 4.33 助焊剂管理系统

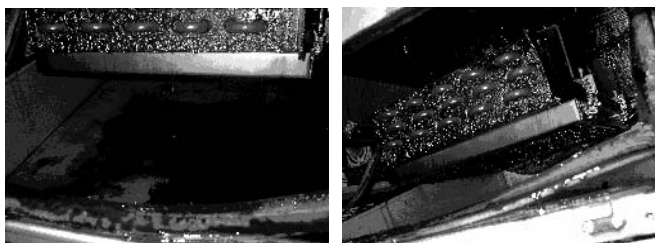


图 4.34 大量助焊剂在冷却区的凝结

4. 冷却系统

由于无铅焊接温度提高，在相同的冷却能力下，无铅焊接设备出口的 PCB 温度会比较高，焊接质量会受到影响，因此选择冷却速率高和冷却区长的设备有利于保证焊接品质和保护操作人员。一般要求 PCB 在出口处的温度低于 75℃。

再流焊炉的冷却系统对焊接质量有很大的影响，它决定焊点的结晶形态、内部组织，影响焊点的可靠性，另外还对其焊点外观有一定的影响。对于非共晶系无铅钎料，影响更为明显，因此要严格控制冷却速度。液相线以上需要快速冷却，否则高温 PCB 和元器件的热量将使液相线以上的时间增加，使 IMC 增厚，影响焊点的可靠性。

较快的冷却速率会使晶粒细小，强度得到提高，但同时会增加残余应力。在工业生产中，焊点冷却结晶时大多为非均匀形核，假设晶胚的体积为 V ，表面积为 S ，液固两相单位体积的自由能之差为 ΔG_v ，单位面积的表面积为 σ ，则系统自由能的总变化为

$$\Delta G = -V\Delta G_v + \sigma S \quad (4.18)$$

式 (4.18) 中右端的第一项为液体中出现晶胚时所引起的体积自由能的变化，如果是过冷液体，则 ΔG_v 为负值，否则为正值。第二项是液体中出现晶胚时所引起的表面能变化，这一项总是正值。显然，第一项越大越易结晶，第二项越小越易结晶。假设过冷液体中出现一



个半径为 r 的球状晶胚, 则式 (4.18) 变为

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma \quad (4.19)$$

由式 (4.19) 可知, 存在一个 r_k , 当 $r > r_k$ 时随着晶胚尺寸的增大, 系统自由能减小, 反之增大。对式 (4.19) 微分可得

$$r_k = \frac{2\sigma}{\Delta G} = \frac{2\sigma T_m}{L_m \Delta T} \quad (4.20)$$

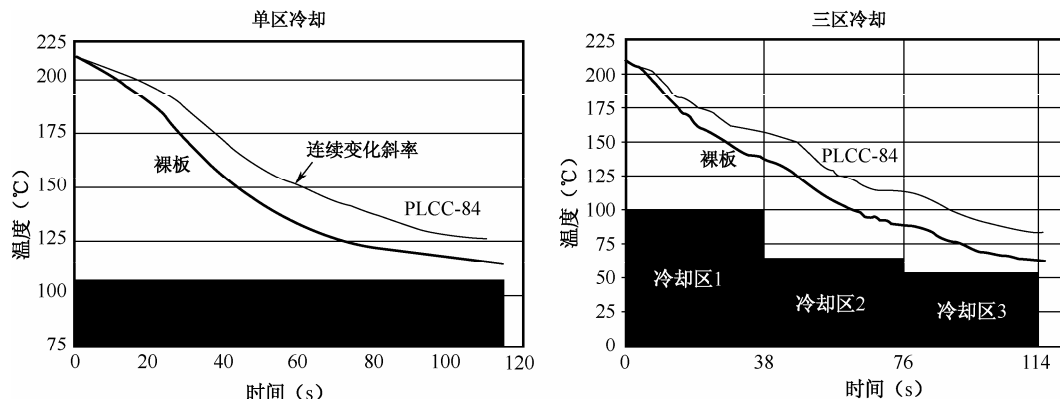
式中, L_m 为结晶潜热; r_k 为临界半径。

冷却速率越大, ΔT 越大, 临界半径越小, 过冷液体中的最大相起伏半径 r_{\max} 越大, 当 $r_{\max} > r_k$ 时晶胚转化为晶核, 结晶速率加快, 晶核多, 晶核半径 d 变小。多晶体金属在常温下的屈服强度随其晶粒细化而提高, 细化晶粒具有晶界强化作用。屈服强度与晶粒直径之间的关系满足霍尔—佩奇公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

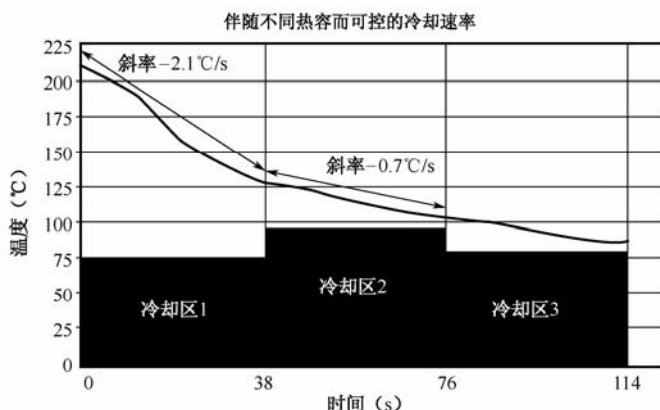
式中, σ_0 为常数, 表示晶内对变形的阻力, 相当于单晶体金属的屈服强度; k 为常数, 表征晶界对强度影响的程度, 与晶界结构有关, 而与温度的关系不大; d 为多晶体中各晶粒的平均直径。

在无铅化焊接中, 要使用先进的内部单元热交换器以确保稳定高效地控制冷却速率。控制冷却时的温度梯度是为了防止对电路板和元器件的物理损伤, 这种损伤在冷速太快、太慢和不平衡时都会发生。针对以上问题, 从工艺考虑, 加热区与冷却区要分开, 否则加热区的热流会迁移到冷却区。再流焊设备的冷却区应根据不同要求采用不同冷却方式 (空冷、水冷和制冷机冷却), 设置多区冷却, 以增加曲线的柔性。多区冷却可以控制不同的冷却速率, 得到良好的晶粒和焊点。在第一区, 冷却速率大一点, 可以使液态钎料膏很快过渡到固态, 得到细晶粒组织, 从而提高强度和可靠性; 在第二区和第三区, 可以缓慢冷却或采取保温—冷却方式, 释放残余应力。W.James Hall 等人通过试验得到: 单区冷却, PLCC-84 114s 降到 124°C, Bare Laminate 降到 114°C; 三区冷却, PLCC-84 114s 降到 83°C, Bare Laminate 降到 63°C, 如图 4.35 所示。



(a) 三区冷却与单区冷却效果对比

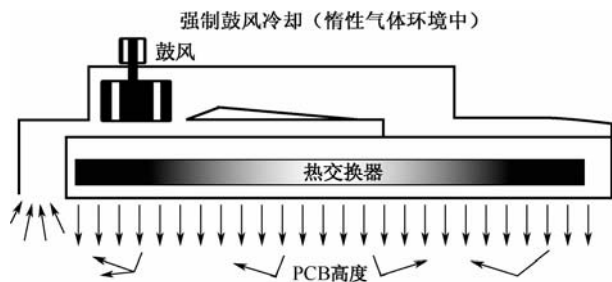
图 4.35 冷却区温度曲线



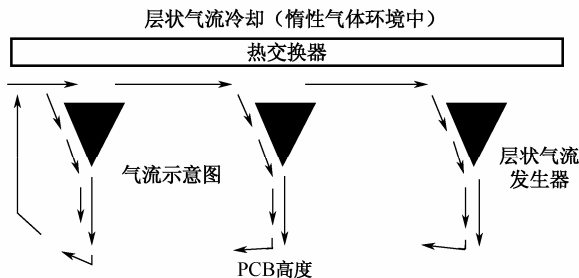
(b) 多区冷却可以提高曲线的柔性

图 4.35 冷却区温度曲线 (续)

传统冷却方式中通过风扇或鼓风机的气体循环容易产生紊流，将会增加气体的混合程度，导致来自焊接区富含助焊剂气体的混入。风扇驱动含有助焊剂的气流进入冷却模块中，遇到冷的表面将会凝结，凝结的助焊剂阻碍热交换器，影响冷却效应，而且如果掉到 PCB 上将产生焊点污染。大容量循环气流增加了对冷却区气氛中助焊剂污染控制的困难。Grad Bailey 等人介绍了一种新的冷却方式——薄气流冷却，如图 4.36 所示，其优点为减少循环气流，降低与冷却模块接触的气氛中助焊剂的密度；减少紊流，避免与来自预热区和焊接区的助焊剂气体的混合；增加撞击速度，减小温度差，降低助焊剂的冷却率；提供稳定的冷却性能，使焊点更光亮，微观组织更好，金属间化合物更薄（见表 4.10），可靠性更高。由于薄气流冷却减少助焊剂的凝结，导致其具有高的冷却效率。薄气流冷却的高效率可保持 11 周，而传统冷却的高效率只保持 3 周。



(a) 传统鼓风循环冷却



(b) 薄气流冷却气流循环方式

图 4.36 传统鼓风循环冷却与薄气流冷却气流循环方式



表 4.10 两种冷却方式下金属间化合物的厚度

冷却方式	金属间化合物的厚度 (μm)	
	空气中	氮气中
鼓风循环冷却	1.38	1.45
薄气流冷却	1.08	1.04

5. 氮气 (N_2) 保护

除非使用熔点较低（与有铅合金相当）的合金钎料，且耐氧化性也与有铅合金相当，或少设备温度爬升能力很好，能使用 170°C （与有铅合金相当）以下的预热温度，否则氮气保护功能是必需的。另外，考虑到有时需要使用低固体、低活性（免清洗、低残留）钎料膏，因此为了防止氧化和增加润湿性，也必须进行氮气保护，一般要求氮气浓度为 $100\sim 1000\text{ppm}$ 。

使用 N_2 保护有益于焊接工艺和焊接质量的改善，但同时也增加了成本，因此在保证焊接质量的同时应减少 N_2 的消耗。可采用可变的风扇速度来降低 N_2 的消耗；比如 BTU 炉子可检测是否有 PCB 正在通过，当炉中没有 PCB 通过时，系统会自动减小风扇速度、空气循环和氮气供应；还可以在智能控制时精确调节对流速率，从而减少 N_2 的消耗。另外，也可以通过减小炉子入口、出口和采用闭环氮气控制系统来减少 N_2 的消耗。炉子入板进出口被定制为最小可通过 PCB 的尺寸，则进入炉体中的空气就很少。最好的办法就是安装一个帘子或一些百叶窗和门，这些门通过自动传感器激活而允许 PCB 进出。同时，内部设计的改造可以使气体以很薄的气流方式流动，并且没有牺牲热效率。

6. 其他

高密度组装技术也要求对焊接设备进行改造。双面板的组装密度虽然很高，但在实际的产品中还会存在一些插件，如变压器、功率管电阻和发光管、插座等。大尺寸高密度双面板很重，而焊接温度一般又高于基板的玻璃转化温度，这样 PCB 就容易弯曲、变形，因此在设计炉体时，应该配备中央支撑系统，以解决 PCB 的弯曲问题。此外，传送带运行要平稳，传送带的震动会造成较小元器件移位、吊桥、冷焊等焊接质量缺陷。

4.9.4 有铅+无铅混装再流焊接温度曲线设置

目前电子行业正在从有铅向无铅转换。根据无铅、有铅混用的组合情况，主要有以下几种，如表 4.11 所示。

表 4.11 有铅、无铅混装组合情况

元器件	合金组合	其他情况	对焊点质量的影响
BGA	SnPb 焊球/无铅钎料膏	无铅再流焊曲线	焊点会产生很大空洞
	无铅焊球/SnPb 钎料膏	SnPb 再流焊曲线，但峰值温度大于 217°C ，一般为 $225\sim 230^\circ\text{C}$	由于在 SnPb 区域所收拉力过大，在早期易造成焊点开裂
SMT 元器件	SnPb 镀层与无铅钎料膏（再流焊工艺）	SAC 钎料膏	Pb 会在最后冷却区域聚集偏析，导致焊点早期失效



续表

元器件	合金组合	其他情况	对焊点质量的影响
SMT 元器件	SnPb 镀层与无铅钎料膏（再流焊工艺）	SnBi 钎料膏	形成 SnPbBi 三元低熔点相，导致早期失效
	SnPb 镀层与无铅焊锡（波峰焊工艺）		最上层的焊盘可能起翘
	无铅镀层与 SnPb 钎料膏	镀层与钎料膏的金属含量比例十分相关	可能有大量 Ag、Au 等从镀层溶解聚集在焊点内部，要慎重评估
	无铅镀层与 SnPb 焊锡（波峰焊工艺）		基本可以忽略其影响

1. 工艺方面的注意事项

有铅、无铅混用并组合时，除了要兼顾有铅的传统焊接工艺问题外，还要解决无铅钎料合金所带来的熔点高及润湿性差等问题。当有铅、无铅问题交织在一起时，在工艺上处理此类问题比处理纯有铅或纯无铅的问题要棘手。需要特别关注下述问题。

- ① 高温对元器件的不利影响。
 - CTE 不匹配所造成的影响（0603 以下元件很少开裂，1206 以上元件已发生开裂）。
 - 爆米花现象更严重（温度提高 10℃、MSD 下降 1 级）。
 - 高温对 PCB 的不利影响（选择高 T_g 基材）。
- ② 电气可靠性。
- ③ 混合组装的返修工艺问题。
- ④ 钎料膏与 BGA/CSP 焊球的相容性。
 - 四种组合质量排序（优→劣）：SAC 焊球/SAC 钎料膏 \geq SnPb 焊球/SnPb 钎料膏 \geq SAC 焊球/SnPb 钎料膏 $>$ SnPb 焊球/SAC 钎料膏。
 - 四种组合气孔率排序（低→高）：SAC 焊球/SnPb 钎料膏 $>$ SAC 焊球/SAC 钎料膏 \geq SnPb 焊球/SAC 钎料膏。

2. 炉温曲线与控制方面的注意事项

- ① SnPb 钎料与 SAC 钎料混合组装再流焊接特征。
 - 两种成分钎料不同时熔化。
 - 混合后钎料合金的熔点降低。有资料显示，Sn（10~15）Pb 镀层的金属引线将使组合后的无铅钎料膏熔点降低 10℃ 左右。
- ② 再流焊温度与微观结构。
 - 当使用无铅钎料膏焊接有铅焊端时，必须控制 Pb、Cu 等含量，要配制相应的助焊剂，还要严格控制温度曲线等工艺参数，否则会引起质量问题。
 - 当使用有铅钎料膏焊接无铅合金焊端时，不同温度下形成的焊点微观组织无明显差异。
 - 当使用有铅钎料膏焊接无铅 BGA 焊球时，温度高于 225℃ 以上时焊点微观组织较佳（225~235℃）。
 - 当使用有铅钎料膏焊接无铅 BGA 焊球及焊端时，可在有铅温度曲线基础上进行微调（见下）。



③ 微调分类。

- 对于 PBGA 及 CSP 来说, 将再流焊峰值温度优选为 230°C ($225\sim 235^{\circ}\text{C}$)。
- 当焊端为 Sn, 焊球为 SAC 时, 将再流焊峰值温度提高至 235°C 或 230°C 。
- 当焊端为 Ag、Pd、Au 可熔性材料, 焊球为 SAC 时, 将再流焊峰值温度提高至大于 217°C (如 230°C)。

3. 有铅、无铅混合组装可行性评估

- ① 焊点机械强度的验证 (无铅焊点的硬度和强度比 SnPb 高, 但不等于可靠性就好)。
- ② 焊接金属偏析引起的剥离、翘起等缺陷的防治。

4.10 再流焊接常见缺陷及防治措施

影响再流焊接成功率的因素主要包括 PCB 焊盘设计、钎料膏质量及钎料膏的正确使用、元器件焊端和引脚及 PCB 基板的焊盘质量、钎料膏印刷质量、元器件贴装质量、再流焊接温度曲线调试及再流焊接设备质量等。

在现代电子产品组装生产中, 不恰当的再流焊炉温度曲线设置、不合理的材料选择及较差的焊接环境等因素可能产生很多的焊接缺陷, 最终可能带来长期的可靠性问题。常见的主要焊接缺陷包括较差的润湿性 (缺焊、冷焊、空焊)、钎料球、钎料珠、立碑 (吊桥)、桥连、元器件开裂、过度的金属间化合物生长、焊点空洞等。下面对常见焊接缺陷进行描述。

4.10.1 焊点脱焊

焊点脱焊指再流焊接中元器件的一个或多个引脚不能与焊盘正常接触, 如图 4.37 所示。

1. 产生原因

- ① 印刷过程中, 钎料膏未能充分脱模释放。
- ② 元器件引脚变形或共面性差。
- ③ PCB 翘曲或焊盘共面性差。



图 4.37 焊点脱焊

2. 抑制措施

- ① 优化模板加工工艺及正确设计开孔尺寸。
- ② 严格控制钎料膏的工作环境, 防止变干。
- ③ 元器件在传送过程中注意不要碰撞。
- ④ 避免将元器件堆积放置。
- ⑤ 控制 PCB 焊盘共面性要求。
- ⑥ 控制弯曲 (扭曲度) 应小于 0.75%。



4.10.2 钎料膏再流不完全

钎料膏未完全熔化，如图 4.38 所示。

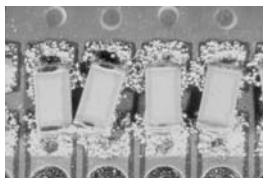


图 4.38 钎料膏再流不完全

1. 产生原因

① 温度曲线设定不当，峰值温度不够高或再流焊接时间（温度高于钎料熔点以上的时间）不足。

② 贴片与再流焊工序间隔时间太长，导致钎料膏中的助焊剂活性丧失，未能充分熔合、润湿、铺展。

2. 抑制措施

- ① 调整再流焊温度曲线，保证峰值温度及再流时间。
- ② 控制工序间隔时间，保证元件贴装后在 2 小时内进入焊接。

4.10.3 润湿不良

熔融钎料部分润湿焊盘或元器件引脚，但是未能完全铺展在焊区，如图 4.39 所示。

1. 产生原因

- ① PCB 焊盘或元器件引脚/焊端的可焊接性差。
- ② 助焊剂活性不足。
- ③ 温度曲线的浸泡区时间过长，致使助焊剂过度消耗，失去活性。

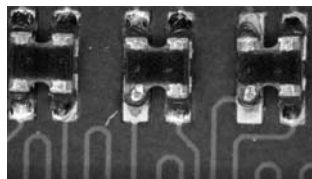


图 4.39 润湿不良

2. 抑制措施

- ① 严格控制来料的可焊性。
- ② 正确使用助焊剂。
- ③ 合理设定再流温度曲线。

4.10.4 墓碑

墓碑现象如图 4.40 所示，主要出现在质量较轻的片式无源元件上。产生该现象的根本原因在于元件两端出现非同步润湿，先发生润湿的一端在钎料/片式元件焊接端界面张力的作用下克服元件自身重力而将元件牵引抬起。非同步润湿主要归因于元件两端焊接面的物理状态出现差异，如受热不均导致一端的钎料膏先熔化、元件两端焊接面或焊盘的可焊性差异等。在氮气保护条件下将增大钎料/片式元件焊接端的界面张力，从而可能导致此类缺陷增加。

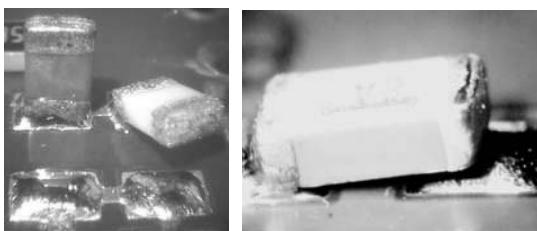


图 4.40 墓碑

1. 产生原因

- ① 元器件焊端由于温度或可焊性差异导致初始润湿性差异。
- ② PCB 焊盘两端由于热容差异导致钎料熔化时间差异。
- ③ PCB 阻焊层质量不佳形成“跷跷板”，将元器件一端抬起。
- ④ 再流焊接设备温度均匀性不佳，存在温度梯度。
- ⑤ 采用氮气保护或汽相焊工艺。
- ⑥ 印刷或贴片偏移。
- ⑦ 钎料膏活性不足或助焊剂均匀性差等。

2. 抑制措施

- ① 严格控制原材料的可焊性。
- ② 优化焊盘设计，防止出现热容差带来的温度差。
- ③ 控制 PCB 阻焊层制作工艺，防止高出焊盘面形成“跷跷板”。
- ④ 保证再流焊接设备的温度均匀性及稳定性。
- ⑤ 通过调试温度曲线的浸泡区时间以减少温度梯度。
- ⑥ 采用氮气保护时控制残余氧含量在合理范围内。
- ⑦ 检查钎料膏搅拌是否均匀、保管是否符合规定。
- ⑧ 检查印刷机或贴片机的精度是否合适。

4.10.5 钎料珠

钎料珠是在再流焊接过程中形成的一或两个较大球状或不规则的钎料球，一般位于片式元件两侧或底部，如图 4.41 所示。钎料珠易引起相邻两个焊点的短路。而对于采用清洗工艺的生产线来说，钎料珠不是严重缺陷。

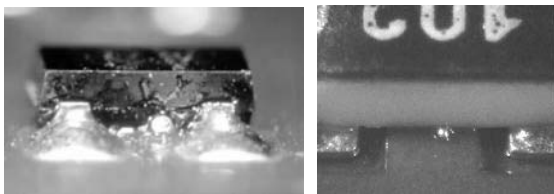


图 4.41 钎料珠



1. 产生原因

- ① 钎料膏在焊盘上过量沉积。
- ② 钎料膏印刷偏移。
- ③ 预热阶段的助焊剂蒸发过于激烈。

2. 抑制措施

- ① 优化钢网开口设计，降低元器件焊端下方钎料膏的沉积量。
- ② 检查印刷机精度是否合适。
- ③ 调整再流焊温度曲线。

4.10.6 钎料球

钎料球如图 4.42 所示。左图中的钎料球是在焊接过程中钎料由于飞溅等原因在 PCB 上某些位置形成的不规则的分散小球。钎料球常见于元器件引脚周围及引脚和焊盘的间隙等位置，也有出现在离焊点很远的位置，易引起电流泄漏、电气噪声甚至短路。右图中的钎料球对于细间距元器件存在危险，它主要是由于在预热过程中钎料颗粒被助焊剂溶解携带停留在焊盘与阻焊膜之间间隙内，再流焊接时不被吸回到焊点上而形成的。

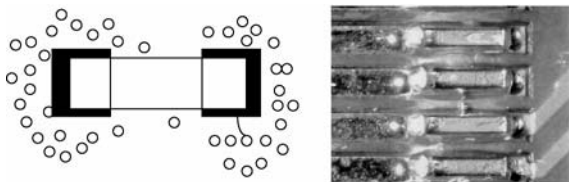


图 4.42 钎料球

1. 产生原因

- ① 钎料膏受潮。
- ② 再流焊接温度曲线的升温速率过高。
- ③ 钎料膏中的合金粉末氧化严重或助焊剂活性不足。

2. 抑制措施

- ① 避免钎料膏暴露在高温或潮湿环境中发生氧化或受潮。
- ② 优化温度曲线，控制预热阶段的爬升斜率，防止飞溅。
- ③ 选择活性较强的助焊剂或采用惰性气体保护。

4.10.7 桥连

桥连如图 4.43 所示，指相邻的导体或电极间被钎料连接起来。

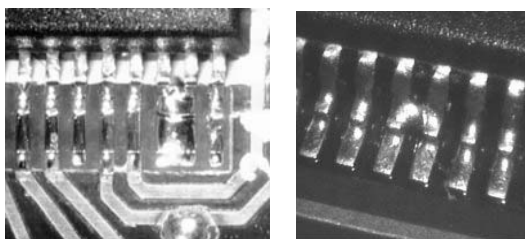


图 4.43 桥连

1. 产生原因

- ① 印刷精度或贴片精度不够。
- ② 钎料膏印刷量过多。
- ③ 钎料膏坍塌。
- ④ 贴片压力过大。

2. 抑制措施

- ① 检查印刷机或贴片机精度是否合适。
- ② 减小模板开孔尺寸约 10%或减小厚度。
- ③ 正确选择钎料膏，防止热塌或冷塌。
- ④ 贴片压力不要过大。

4.10.8 元器件开裂

元器件开裂是指树脂封装或陶瓷封装等起泡、开裂，如图 4.44 所示。



图 4.44 元器件开裂

1. 产生原因

- ① 树脂封装吸潮进入再流焊接时伴随急剧升温，水汽汽化而产生爆裂。
- ② 基板和元器件的膨胀系数不匹配，受到热冲击产生应力导致开裂。
- ③ 在组装过程中受到外部机械应力而导致开裂。

2. 抑制措施

- ① 改善元器件的保存环境，防止吸潮。



- ② 如果吸潮，则先进行烘烤再进行再流焊接。
- ③ 调整温度曲线，降低升温斜率。
- ④ 规范操作流程和步骤，并增加防护，防止受外力碰撞。

4.10.9 其他

再流焊接缺陷还包括芯吸、空洞、爆板、BGA 冷焊、BGA 球窝等，本章不再描述，详见现代电子装联工艺技术丛书之《现代电子装联再流焊接技术》及《现代电子装联工艺缺陷及典型故障 100 例》。

思 考 题


1. 简述再流焊接温度曲线的特征及阶段作用。
2. 简述再流焊接温度曲线的设置影响因素及三关键评估要素。
3. 简述再流焊接温度曲线的测试步骤及方法。
4. 对比常见几种再流焊接加热方式各自的特征及优、劣势。
5. 简述再流焊接温度曲线的各阶段特征与常见焊接缺陷之间的关系。
6. 简述红外+热风再流焊接技术的优势特点。
7. 简述无铅化对再流焊接设备的影响。
8. 简述墓碑现象的产生原因与抑制措施。
9. 简述桥连现象的产生原因与抑制措施。


第5章 波峰焊接技术




本章要点

 概述

 波峰焊接中的热、力学现象

 波峰焊接工艺窗口

 波峰焊接设备结构及其性能评估指标

 波峰焊接工艺过程控制

 波峰焊接常见焊点缺陷及防治措施



5.1 概 述

5.1.1 波峰焊接的定义

波峰焊接（Wave Soldering）是指将熔融的液态钎料借助泵的作用，在钎料液面形成一特定形状的钎料波峰，而装载了元器件的 PCB 以某一特定角度及一定的浸入深度穿过钎料波峰来实现连接点的焊接过程。

5.1.2 波峰焊接的工艺特点

与传统的手工焊接相比，波峰焊接工艺具有如下特点：

- ① 生产效率高，成本相对较低；
- ② 提高了焊点的质量和可靠性，消除了人为因素对产品质量的干扰和影响；
- ③ 产品质量标准化；
- ④ 相对于手工焊接而言改善了操作者的工作环境，且可以完成手工操作无法完成的工作。

5.2 波峰焊接中的热、力学现象

5.2.1 波峰焊接入口点的热、力学现象

波峰焊接时，波峰的入口点是钎料波冲刷力最大的地方，当涂覆了助焊剂的 PCB 从这里穿过时，这些助焊剂在预热阶段就开始与被焊金属表面的氧化物发生反应，并使其余的污染物变得松弛，这样 PCB 上的助焊剂和其他污染物就能在该点受到高流速的强烈的擦洗作用。接着熔融的钎料将润湿其下面的基体金属表面，从而在入口这一点上形成由基体金属、熔融钎料、助焊剂层组成的三相能量系统。

钎料迅速流动造成的冲刷作用有助于将金属表面的可溶性镀层、有机膜、助焊剂及表面污染物从板面上冲走。金属表面上金属可溶性镀层迁移发生在金属达到润湿温度之前，热传导开始进行的几分之一秒的时间内。如果基体金属表面的可焊性、温度、亲和力等均合适，浸润就会瞬时发生，较致密的钎料将替换原有的可溶性涂层，同时在钎料和基体金属之间会建立起一个极好的热桥。在已涂上金属膜的基板和元器件上，将随之发生下述情况：

- ① 如果膜是易熔性的，且其熔点比钎料的熔点低或接近，在浸润基础上建立起来的热桥将熔化这种膜，同时受波峰冲刷而被新鲜的钎料层所取代；
- ② 如果原镀膜是可溶性材料（如铜、金、银），则视其溶解度及厚度的不同，要在波峰温度下停留足够长的时间才能被冲洗掉，并形成一种杂质留在钎料槽内。



5.2.2 热交换和钎料供给区的热、力学现象

在波峰入、出口之间的区域是热交换和钎料供给区，一旦基体金属钎料系统达到润湿温度，润湿就发生了。但 PCB 还必须在钎料波峰中保持一段时间，以保证热量传递到 PCB 的通孔及元器件上，并蔓延到 PCB 上表面形成润湿圆角。热交换区与预热温度结合起来就决定了 PCB 通过波峰时的速度。当然，元器件的热容量和 PCB 的厚度也是影响的重要因素。

冶金反应是在熔融钎料与基体金属接触的整个过程中进行的。良好的热传导可使钎料在 PCB 金属化孔里上升到一个较高的高度，这一高度取决于以下两个过程：

- ① 首先，助焊剂溶剂必须先于钎料上升，同时要有足够的热量以产生充分的溶剂反应；
- ② 其次，需要增加热量使导线和金属化孔的温度达到润湿温度，然后将钎料填充入孔内替换溶剂。

静压力仅能推动钎料使其在孔里上升一定高度，因为焊接时只是板厚的一部分浸入钎料波峰中。钎料在孔内继续上升主要是依靠受温度影响的润湿力的作用，即登上 PCB 上表面的动力是“毛细作用力”，它决定了钎料爬到上表面并形成焊点的大小和速度。

热平衡受 PCB 设计、元器件类型及元器件安装密度的影响很大。除波峰供给热量外，还有在预热期间装配的元器件所吸收的热量。在正常状态下，升起的钎料会扩展到上表面的焊盘和引线上并形成一个完整的焊点。在孔壁、上表面焊盘及引线表面上的可溶性镀层或可溶性镀层，都再不会像在 PCB 下表面那样被冲刷掉，它们大都集中到外层并在接近于表面处离析出来。

浸入钎料一定深度而产生的向上压力，虽然在上表面焊点敷形形成期间是一个推力，但其主要作用还是逐步地输送钎料和传热，而不是使钎料向上爬。浸入的深度与 PCB 的厚度及类型相适应。单面 PCB 和柔性 PCB 应浸入板厚的二分之一，孔金属化的 PCB 则应浸入板厚的三分之二，而大于六层的多层 PCB 应浸入板厚的四分之三。多层板由于热容量较大，对本来就要求严格的孔径/厚度的比例就更加严格了。此时均热便成为主要问题，因而增设顶部预热工位有时是有利的。因为多层板接地层像一个大散热片，根据用途不同，其加热和焊接要求也不相同，所以并没有一个通用的方法，最好通过对波峰的操作设计来解决。

5.2.3 波峰退出点的热、力学现象

在退出点附近，由钎料液体动力学所产生的对钎料的向上压力已不是形成焊点的主要力，而润湿力是钎料上升并通过金属化孔的主导力。如果设备能完全控制这一点，就可以获得可靠性高的焊点，并大大减少焊后的修正量。

为了得到最佳的焊接效果，要求钎料敷形高度均匀，通过控制波峰出口处剥离区内的作用力就能达到这个目的。这些作用力基本上可归纳为以下两类。

- ① 表面力：包括钎料和被连接的基体金属的界面力（和周围环境无关），以及液态钎料的内聚力（主要受接触的第二相的影响，此处还受助焊剂、空气或油等周围环境的影响）。
- ② 液体压力：随波峰设计的不同和 PCB 底板的图形的不规则而变化。

分析形成焊点时所有的力，可以看出，表面能的作用是使钎料保持在焊缝里，它明显与



孔径、线径和 PCB 厚度的比例有关。同时还有重力及受钎料波峰后撤的拉力。重力是固定的因素，而拉力是潜在的问题。如果给焊缝一个向下的拉力，则焊缝上面就会形成一个凹月面，甚至会将其抽空。

波峰出口的最佳处是在液内各作用力能互相平衡的地方。为此，应尽量使 PCB 的传送速度与钎料的流动速度在同方向上相匹配处使焊点脱离波峰。理想的出口点应由设备制造者在喷嘴波形设计中提供标准的速度匹配，并且可以由操作者根据生产情况在一定的偏差内进行适当的调节。

为了进一步控制焊点的尺寸，在波峰出口处采用倾斜传送方式可使分离的几何形状更加良好。使用的倾斜角度随钎料波形结构而变，一般由设备制造者确定。

控制焊点形成的另一个途径是将出口处建立在三相表面能平衡的系统上。在纯钎料波峰中，系统由已经润湿的 PCB 铜箔、液体波峰钎料及空气组成。在焊接温度下的钎料与空气直接接触并形成氧化层。该氧化层与气体纯度、氧化物的种类及湿度有关。

焊点离开波峰之后是从顶部向下逐渐凝固的。为了避免产生空洞，冷却速度不宜过快。

5.2.4 波峰焊接过程中的温度特性

在波峰焊接过程中，热量是绝对必要的条件。热过程的控制及热量的有效利用，是确保波峰焊接效果的重要因素。在单波峰情况下，PCB 在进入波峰焊接设备系统后焊接面上的温度随时间的变化关系如图 5.1 所示。当然，对于不同的设备系统，该曲线会稍有不同，但总的规律是大同小异的。

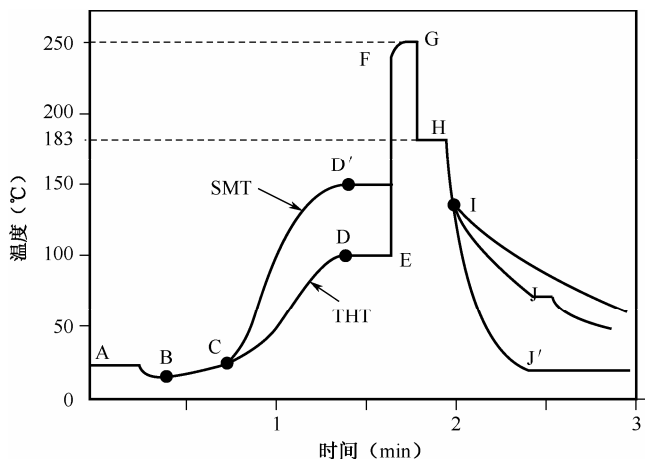


图 5.1 波峰焊接温度曲线

当给处于室温下的 PCB 通过助焊剂涂覆器涂覆助焊剂时，PCB 的温度接近于助焊剂的液温（B 点）。CD 区间为预热区，涂覆了助焊剂的 PCB 从 C 点开始进入预热区，受热后助焊剂中的溶剂不断被蒸发，而助焊剂中的固体成分开始分解出能净化基体金属的活性物质。到达 D 点时达到预热所要求的温度。随着 PCB 基板材质、铜箔黏合剂等耐热性能的提高，预热温度也有提高的倾向。特别是 SMC/SMD 的大量应用，使得预热温度被普遍提高到与焊接温度的差值小于 100℃ 以内的程度，如图 5.1 的 D' 点（150℃ 左右）所示。



通过预热区D点后的PCB已经位于钎料槽的上方,钎料槽表面的辐射热继续维持对PCB的预热。PCB保持预热所达到的温度(DE段)继续前进,直到与钎料波峰相接触的E点。PCB在E点处浸入钎料波峰后温度急剧上升到达F点,并不断逼近饱和温度(G点),从F点到G点的区间为热交换区。F和G之间温差的大小与预热过程是否充分有关。PCB在此区间要经历3~5s的时间,这个时间的长短与PCB上的热容量有关。

PCB过了G点开始脱离钎料波峰,焊点上的钎料温度虽然急剧下降,但钎料仍为液态,温度降到H点(183℃附近)后并停留一段时间(曲线保持为水平直线段),放出潜热完成液相到固相的转变。H—I为自然冷却段,从I点开始进入强制冷却区,其中I—J为强制风冷的冷却曲线,而I—J'则为采用强制液体冷却的快速冷却曲线。

5.3 波峰焊接工艺窗口

5.3.1 助焊剂涂覆

在波峰焊接过程中,助焊剂本身并不参与形成焊点,但是会影响焊接的速度和焊点质量,其作用概括起来主要有如下两点。

1. 减小钎料的表面张力, 增强钎料的润湿效果

焊接区域中的助焊剂,能够以促进钎料漫流的方式影响表面能量平衡,降低液态钎料的表面张力,减小接触角。

当金属表面存在氧化膜时,液态钎料往往凝聚成球状而不与金属发生润湿,这是因为存在氧化膜的金属表面的张力比金属本身的表面张力低得多。可以通过液态钎料终止漫流时的平衡方程式来解释这一现象。

液态钎料终止漫流时的平衡方程式为

$$\cos\theta = (\gamma_{\text{SF}} - \gamma_{\text{LF}}) / \gamma_{\text{LS}} \quad (5.1)$$

式中, θ 为液态钎料与被焊金属间的接触角; γ_{SF} 为被焊金属与助焊剂之间的界面张力; γ_{LF} 为液态钎料与助焊剂之间的界面张力; γ_{LS} 为液态钎料与被焊金属之间的界面张力。

由式(5.1)可以看出,要使液态钎料润湿被焊金属(接触角小于 90° ,即 $\cos\theta > 0$),必须使 $\gamma_{\text{SF}} - \gamma_{\text{LF}} > 0$,但是覆盖氧化膜的金属表面与无氧化膜的洁净金属表面相比,表面张力显著减小,当出现 $\gamma_{\text{SF}} - \gamma_{\text{LF}} < 0$ 的情况时,将出现液态钎料无法再被焊表面润湿的情况。

因此,要提高润湿性(即减小接触角 θ),必须增大 γ_{SF} 或减小 γ_{LF} 及 γ_{LS} 。助焊剂除了可清除被焊金属表面的氧化膜,使 γ_{SF} 增大外,另一个重要作用即减小液态间的界面张力 γ_{LF} 。

2. 清洁被焊母材, 去除其表面的氧化物

在一般情况下,被焊金属和易熔的钎料合金表面均具有一层妨碍形成连接界面的氧化膜,该氧化膜通常不溶于任何溶液,不能像清除油污一样被洗掉,但是这些氧化膜可以与某些材料发生化学反应,生成可溶的化合物。利用此原理,我们将此种材料用于助焊剂中以除



去氧化物，达到净化被焊金属的目的。

由于 PCB 板面上存在大量的窄缝和深层毛细管现象，给波峰焊接后彻底清除助焊剂残留物增加了困难，因此一个连续、均匀的对整个 PCB 的助焊剂喷雾是必需的。用尽可能最低的气压来施用尽可能最细的颗粒，将获得最好的结果。较高的气压设定可能引起颗粒的反弹作用，因而不会改善 PCB 表面的润湿。因此，选择一种最适合 PCB 的助焊剂喷雾处理器，使用无 VOC 的助焊剂尽可能达到最精细的颗粒，是达到良好的通孔渗透和成功的水膜挥发的关键。

在波峰焊接工艺中，PCB 上的助焊剂喷雾涂覆量应精确控制在 $300 \sim 750 \text{mg/dm}^2$ 。若超过 750mg/dm^2 ，将可能出现过量的助焊剂从 PCB 上滴落下来。适当的助焊剂活性和适量均匀的涂覆是良好焊接的前提，如果助焊剂活性不足或涂覆不良，得到理想甚至是可接受的焊接效果都是不可能的。

5.3.2 预热温度

1. 预热的作用

预热必须确保 PCB 组装件达到最适宜的温度，以激活助焊剂的活性。对于不同的 PCB 组装件，最佳的时间-温度曲线取决于许多因素，而不仅仅是助焊剂的化学成分。这些因素包括 PCB 的设计、波峰上的接触长度、钎料温度、钎料波的速度和形状。

在波峰焊接中，只是在 PCB 上涂覆助焊剂是不够的，助焊剂还必须在活化温度下在 PCB 表面上停留足够的时间。该停留时间和温度是保证助焊剂净化被焊基体金属表面的重要参数。确切的时间和温度取决于具体的波峰焊接设备系统和助焊剂的型号。

预热时间和温度的不足将造成：

- ① PCB 上留下较多的残留物；
- ② 助焊剂活性不能充分激活而造成润湿性差；
- ③ 预热不足还将导致在波峰焊接过程中，因大量气体放出造成钎料珠，以及当液体溶剂到达波峰时产生钎料飞溅，特别是当采用水基助焊剂时，在进入钎料波峰之前，若没有提供足够的预热来蒸发水分，焊球飞溅现象将尤为常见。

然而过多的预热时间和温度，将降低助焊剂在进入钎料波峰之前的化学活性和作用效果。在最佳的温度下焊接，可在钎料波峰上留下足够的助焊剂，这有助于 PCB 在退出钎料波峰时钎料的剥离，对消除桥连和拉尖现象有特殊意义。

2. 预热温度的选择

(1) 使用松香基助焊剂时

针对松香基助焊剂的预热温度究竟如何选择呢？美国休斯飞机公司的应用报告称：“通常，在电路板有元件一侧的温度预热到 $71 \sim 82^\circ\text{C}$ ，这个最佳温度使助焊剂正好进入钎料波峰之前达到发黏状态。预热温度太低会引起钎料滴落和不能排出气体，从而导致虚焊或产生小孔。预热温度过高，溶剂挥发过快，会降低助焊剂的流动性，增加钎料和焊接表面的表面



张力，将导致桥连和钎料堆积等缺陷”。美国学者 HOWARD H. MANKO 针对图 5.2 所示的具有上部辐射加热器的预热器，给出了 PCB 离开预热器时，在层压板上表面测出的温度，示于表 5.1 中。

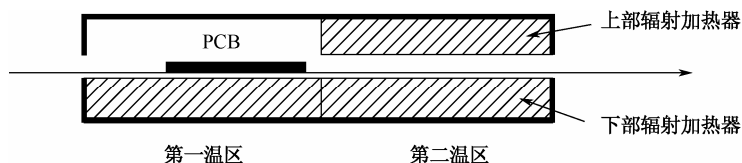


图 5.2 具有上部辐射加热器的预热器

表 5.1 对一般夹送速度和元器件密度下的预热温度（预热器出口处的上表面温度）

PCB 种类	温度 (°C)
单面板	80~90
双面板	100~120
四层以下的多层板	105~120
四层以上的多层板	110~130

日本松下电子株式会社的石黑勇针对有 SMC/SMD 的 PCB 预热条件的选择，认为“一般基板的表面在 130~150°C 下保持 1~3min，如图 5.3 所示。过高易造成助焊剂硬化，导致焊接性能变差；过低，助焊剂分解不充分，易引起气体的滞留，形成焊接缺陷”。

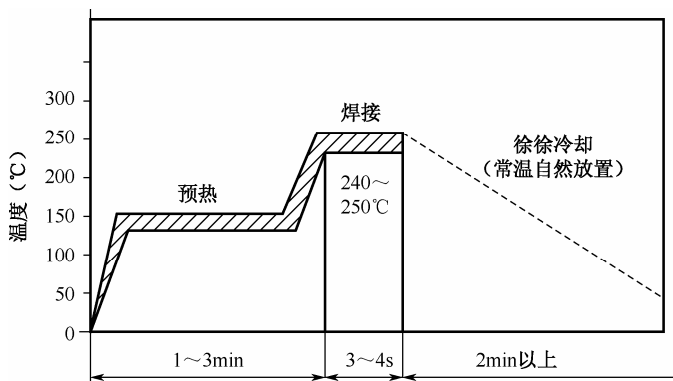


图 5.3 波峰焊接时的温度分布曲线（以陶瓷电容器为例）

瑞士 epm 公司通过验证认为，设计合理的预热系统能保证助焊剂的最好活性，这意味着其内的溶剂（异丙醇、水）将挥发，在 PCB 焊接面上的高温（约 110°C）将驱动化学活性物质分解，然后松香和其他化学物质变成液体，充分流过 PCB 的整个焊接表面，从而使得焊接区与空气隔开以防止再锈蚀。1.6mm 板厚的 PCB 顶面温度约为 85°C。温度测试应在完全无铜底金属的 PCB 表面进行。当 PCB 板厚超过或小于 1.6mm 时，温度将会变高或低。最重要的是 PCB 下侧面的温度要正确，应接近 110±10°C，他们认为该温度对助焊剂中的活性剂与焊接面的基体金属表面的化学反应是最合适的。

日本电热计株式会社的井上喜久雄针对双面环氧树脂覆箔板 1.6t（板厚）在备有三个温区的预热器预热过程中（第一温区为热风辐射复合式，二、三温区是紧相连的辐射式），测得的 PCB 上、下两表面所存在的温度差曲线如图 5.4 所示，两者最大差值可达 25°C。



预热温度是随加热时间、电源电压、周围环境温度、季节及通风状态的变化而变化的。当加热器和 PCB 间的距离及夹送速度一定时，调控预热温度的方法通常是改变加热器的加热功率。

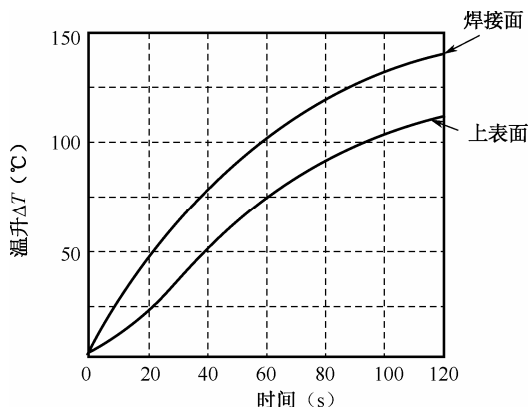


图 5.4 双面板的预热温度特性

(2) 使用免清洗助焊剂时

由于免清洗助焊剂大多是不含卤素的活性剂，故其活性相对偏弱一些，因此必须严格控制预热的时间和温度。免清洗助焊剂的预热时间要比松香基助焊剂略长一些，预热温度也要高一些，这样利于 PCB 在进入钎料波峰之前活性剂能充分活化。以北京晶英公司的 IF2005 助焊剂为例，PCB 元件面的温度通常应控制在 $95\sim 130^{\circ}\text{C}$ ，此时的焊接效果较好。当预热温度偏低时，焊后板面的助焊剂残留物会明显增多。有些功能完善的波峰焊机装备有对 PCB 移动时间的跟踪系统和预热温度的监控系统（如在钎料槽前面安装有高温计），以便对预热过程进行监测。不同型号的免清洗助焊剂对预热温度的要求可能有些差异，这些数据通常在制造商提供的应用说明书中会给出。

5.3.3 钎料槽温度

1. 影响焊接温度的主要因素

在波峰焊接工艺中，和被焊基体金属表面洁净度同等重要的是焊接过程中的加热温度。焊点在加热过程中，主要的影响因素是热源的温度、被焊元器件和零件的热容量和热导，即被焊元器件和零件对焊点的散热效果；另外，还有活化和加热助焊剂、加热和熔化钎料及保证良好润湿所必需的热量。对温度的这些要求必须和焊接设备能提供的热量相平衡。

2. 从焊接特性来看波峰焊接的热过程

(1) 加热温度和接合强度

在焊接中，为了最终获得接合部的最佳合金层，采取一定的加热手段供给相应的热能，是获得优良焊点的重要条件之一。在最佳焊接条件下，焊点强度取决于焊接温度，焊接温度



在 250°C 附近具有最高的接合强度。在最高强度位置处, 焊点表面具有最好的金属光泽, 并且能在界面处生成合适的金属间化合物 (以下简称 IMC)。随着温度的过量升高, 接合界面的 IMC 层生长过厚甚至大量生成 Cu_3Sn 、 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, 从而将导致接合强度降低, 焊点表面将失去原有的金属光泽而出现粗糙的白色颗粒状。

(2) 波峰焊接中的热过程

以有铅钎料 Sn37Pb 为例, 在波峰焊接过程中, 热量是焊接的绝对必要条件, 热过程的控制及热量的有效利用, 是确保波峰焊接效果的重要因素。下图给出了 PCB 在波峰焊接工艺全过程中的温度变化曲线, 如图 5.5 所示。

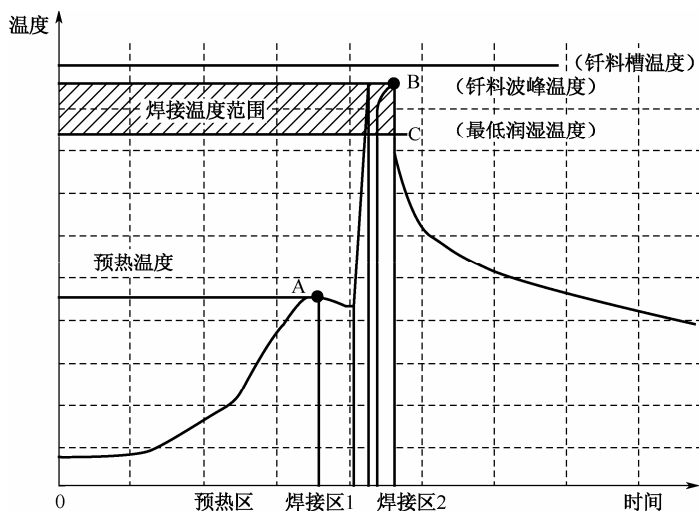


图 5.5 波峰焊接工艺中的热过程

(3) 焊接温度优化范围的确定

为了使熔化的钎料具有良好的流动性和润湿性, 较佳的焊接温度应高于钎料熔点温度 ($21\sim 65^{\circ}\text{C}$)。这一数据不为某一固定值的原因是: 其本身也是焊接时间的函数。日本学者井上喜久雄根据 PCB 夹送速度和钎料波峰的阔度, 给出了钎料的工作温度和浸渍时间的最适宜的配合范围, 如图 5.6 所示。

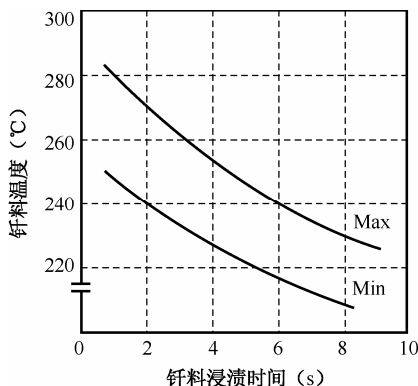


图 5.6 钎料温度和浸渍时间的关系



Max、Min 曲线分别表示焊接条件的最高和最低的临界状态，将工作点选在两条曲线之间是最优的组合，此时容易获得最好的焊接效果。例如，当接合部的有效温度（润湿温度）为 245°C 时，最适宜的浸渍时间范围为 $1.5\sim 4.5\text{s}$ ，优选值为 3.5s 。由于接合部的有效温度往往比钎料槽内的钎料温度低，所以要想保持接合部的有效温度为 245°C ，则钎料槽内的钎料温度应控制在 250°C 左右为宜。因此，钎料槽的温度控制精度是非常重要的，对采用有铅钎料 Sn37Pb 和松香型助焊剂来说，焊点的最佳湿润温度可按下式确定：

$$\text{焊点的最佳润湿温度} = \text{钎料的熔点} + (40\sim 50)^{\circ}\text{C} \quad (5.2)$$

应注意，推荐的焊点润湿温度不一定等于钎料槽中的温度。在焊接过程中，焊点达到的实际温度是介于钎料槽温度和被焊工件温度之间的某一个中间值。目前普遍称呼的“焊接温度”不是指的润湿温度，而习惯指的是钎料槽中的钎料温度。“焊接温度”与润湿温度之间差值的大小与钎料槽的容积有关。“焊接温度”最大值的选择受制于元器件的耐热性和 PCB 基板的热稳定性，目前公认的最佳“焊接温度”为 250°C ，而润湿温度则取决于基体金属和钎料之间所发生的冶金过程，当基体金属材质和钎料成分确定后，其值便成为定值。

5.3.4 传输速度

焊接时间往往可以用夹送速度反映出来。被焊表面浸入和退出熔化钎料波峰的速度，对润湿质量、钎料层的均匀性和厚度的影响很大。每一对基体金属和助焊剂组合都有着自己特有的理想浸入速度，该速度是助焊剂活性和基体金属传热能力的函数。对于导热性较好的材料来说，在采用活性松香助焊剂时可采用较高的浸入速度。而沉积于工件表面钎料的均匀性和厚度，在很大程度上取决于工件从熔化钎料波峰中退出时的速度及退出速度的均匀性。标准做法是取退出速度与进入速度相等。在退出过程中，任何振动都将使钎料表面产生波纹状，抖动将使焊点表面粗糙化。

剖析 PCB 在钎料波峰中的波峰焊接过程，可以划分为 3 个作用区（以下简称波区），如图 5.7 所示。

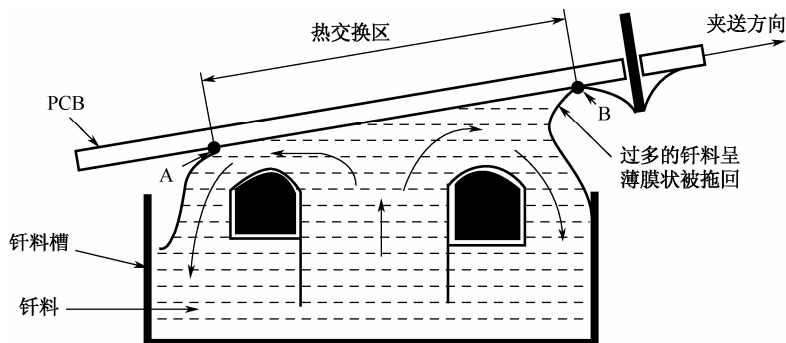


图 5.7 PCB 通过钎料波峰示意图

① 图中的 A 点是进入钎料波峰的点，因 PCB 与钎料的运动方向相反，所以该点的速度差最大。因此，在该点处湍流的冲洗作用最大，这有利于从基体金属表面除掉预热后的助焊剂——锈膜残渣混合物，以使熔融钎料与基体金属直接接触。当达到润湿温度时，便立即产生润湿现象。



② 图中的 AB 段是热交换区。PCB 通过钎料波区时在波峰中的时间必须足够长，以使在润湿温度下的表面能量能够把熔化的钎料吸附到 PCB 的铜箔表面上，从而形成填充良好的焊缝。另外，在接合界面上形成所需要的合金层也需要时间。

③ 图中的 B 点是从钎料波峰中退出的点，在该点上，以润湿形式表现出来的表面能量将使钎料保留在焊缝中，而重力（或钎料的质量）势必把钎料向下拉。这些作用力之间的平衡与孔径/线径的比值及可焊性有关。为使退出点的这些力作用能处于平衡状态，退出点必须选择在位于钎料波峰速度零点的附近脱离。

PCB 在钎料波峰中的浸渍宽度取决于钎料波峰的阔度。当钎料槽中钎料的温度控制在 250°C 时，井上喜久雄还给出了波峰阔度、夹送速度和浸渍时间（PCB 浸入钎料波峰的时间）的关系曲线，如图 5.8 所示。

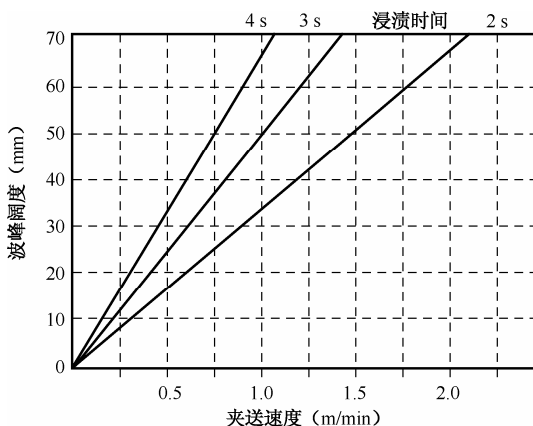


图 5.8 浸渍时间、波峰阔度与夹送速度的关系

设备系统应确保夹送速度能在 $0.5\sim 2.5\text{ m/min}$ 范围内无级变速，而波峰焊接中最适宜的夹送速度要根据具体的生产效率、PCB 基板和元器件的热容量、浸渍时间及预热温度等综合因素通过工艺试验确定。根据大量工业运行中的数据统计，应用中为获得较好的波峰焊接效果，通常一个焊点在波峰钎料中浸渍的时间应控制在 $2\sim 4\text{ s}$ 之间。超过 4 s 时桥连现象和热冲击有增大的趋势，而且还易因过热而损害元器件和 PCB 基板。低于 2 s 则因热量不足，将形成冷焊、拉尖、桥连等焊接缺陷。因此，图 5.8 中 2 s 线和 4 s 线之间所夹的区间才是夹送速度适当的选用范围。例如，针对某机型钎料波峰的热交换区的阔度为 50 mm ，浸渍时间若取 3 s ，则可求得夹送速度为 1 m/min ；浸渍时间若取 2 s ，则夹送速度将提高到 1.5 m/min 。

工业应用中的夹送速度通常要由生产效率来确定。例如，某彩电生产公司根据日产量需要，确定了夹送速度为 1.5 m/min ，为确保良好的焊接效果取浸渍时间为 3 s 。这样波峰焊接设备的钎料波峰必须能提供阔度为 75 mm 的热交换区才行。

不同的波峰焊接机能提供的热交换区的阔度也是不同的。要想获得所用机型热交换区长度的具体尺寸，通常采用带刻度的石英玻璃平板，模拟 PCB 夹送时浸入波峰的深度（通常称压锡深度）在波峰上实际测得。

5.3.5 传输角度

由图 5.7 的分析可知，当夹送倾角较大时，PCB 对钎料波峰的进入点（A）向前下方移



动, PCB 在钎料流体的高速点与波峰钎料接触, 由于速度差的增大, 在切入点的湍流擦洗作用更加明显。这对进一步减小钎料薄层的大小, 拉尖和桥连等均大有好处, 因此把夹送装置倾斜角设置在 $4^{\circ} \sim 9^{\circ}$, 有助于钎料更快地剥离 PCB 并返回波峰。目前公认的较佳的倾角范围为 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 。

5.3.6 波峰高度

在波峰焊接中, 波峰高度的选择对波峰焊接效果也有较大的影响。波峰偏高时, 表明泵内液态钎料流速增大, 将使液态流体流速可能进入湍流(紊流)状态, 导致波峰不易稳定, 甚至溢流到 PCB 的上表面(元器件面)造成被焊件损坏, 钎料氧化明显加剧。从焊点的润湿理论来分析, 过高的波峰还可能会掩盖一些局部润湿不良所形成的焊接缺陷。这是因为良好的润湿和焊缝的填充性, 取决于钎料的表面能和焊缝的毛细吸附现象, 无论是孔金属化的穿孔焊盘还是表面贴装的焊缝均必须是这样的。波峰过高时, 钎料波峰中的波压过高, 润湿过程中的外力作用过大, 会干扰正常的冶金过程。例如, 当接合部存在某些润湿不良的现象时, 此时焊缝的填充可能纯粹是靠外部压力将钎料压入的, 这种焊缝从表面上看虽然也被钎料填充覆盖了, 然而接合部可能未发生冶金过程, 仅仅是一种机械黏附而已, 这是一种典型的虚焊现象。

波峰偏低时, 泵内液态钎料流体流速低并为层流态, 因而波峰跳动小, 平稳, 但对 PCB 的压力也小了, 这也不利于焊缝的填充。

井上喜久雄针对 FSG-300 波峰焊接机给出了波峰高度、钎料流速及钎料压力之间的函数关系, 如图 5.9 所示。例如, 当波峰高度为 10mm 时, 波峰对 PCB 的压力约为 4.78 mmHg, 钎料流速为 266mm/s; 而当波峰高度为 8mm 时, 喷流压力下降为 3.45mmHg, 钎料流速为 190mm/s。

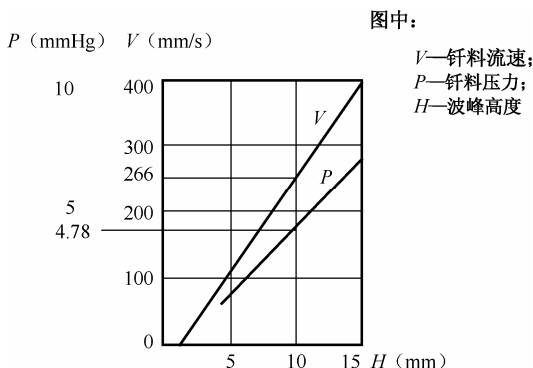


图 5.9 波峰高度、钎料流速及钎料压力的相互关系

一般波峰焊接机的波峰高度可在 $0 \sim 10\text{mm}$ 之间调节, 最适宜焊接的波峰高度范围以 $6 \sim 8\text{mm}$ 为佳。

5.3.7 压波深度

压波深度通常也称为吃锡深度, 是指 PCB 经过钎料波峰时浸入波峰的深度, 如图 5.10



所示。浸入深度过大，不仅波峰钎料易溢到 PCB 的上表面造成事故，而且还易产生桥连现象。浸入深度太浅，易发生局部漏焊。在工业应用中，PCB 经过波峰时的压波深度通常取 PCB 板厚的 $1/2 \sim 3/4$ 。

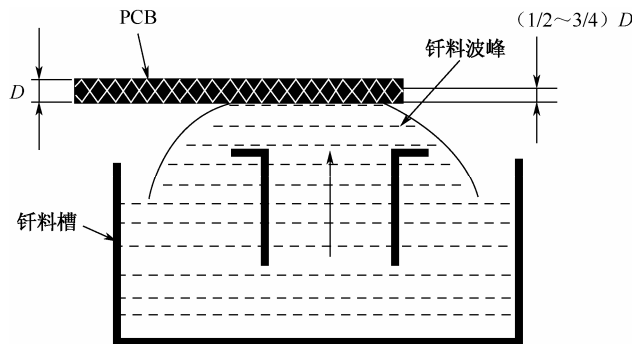


图 5.10 压波深度

对于 SMA 波峰焊接中 PCB 浸入钎料波峰的深度，扰流波与层流波是有差异的。第一波（扰流波）时 PCB 浸入钎料波峰的深度要比较深，以获得较大的压力克服阴影效应，而通过喷口的时间要短，这样有利于剩余的助焊剂有足够的剂量供第二波峰（层流波）使用。

5.3.8 冷却速度

在 SMA 波峰焊接中，焊接后采用 2min 以上的缓慢冷却，对减小因温度剧变所形成的应力，避免元器件损坏（特别是对以陶瓷作为基体或衬底的元器件的断裂现象）是有重要意义的。然而对于无铅波峰焊接来说，则要求对焊接面以较快的速度冷却，以抑制焊缘起翘和焊点晶粒粗大等缺陷。

5.4 波峰焊接设备结构及其性能评估指标

5.4.1 波峰焊接设备系统组成

波峰焊接设备系统一般由助焊剂涂覆系统、预热系统、夹送系统、冷却系统、电气控制系统、钎料波峰发生器等部分组成。

5.4.2 波峰焊接设备性能评估指标

1. 助焊剂涂覆系统

(1) 助焊剂涂覆系统在波峰焊接工艺中的作用

当钎料波峰与 PCB 表面的金属直接接触时，如果表面无污染，则在波峰钎料与基体金



属间将发生原子交换,然而待焊的金属表面一般都会受到氧化物的污染,使用助焊剂将破除氧化层,将松散的氧化层从金属表面移去,从而导致钎料和基体金属间的直接接触。

在波峰焊接工艺中,所用助焊剂的具体牌号一经选定,其功能的充分发挥就取决于施用助焊剂的方法。涂覆助焊剂的真正作用是发生在基体金属表面,仅直接靠近锈蚀膜的那些助焊剂层才是化学净化和防止基体金属表面重新氧化所必需的。虽然助焊剂还具有影响净化过程的某些温度特性,但施用不当可能造成助焊剂的浪费,还会给焊后的净化工作带来麻烦。助焊剂涂覆系统示意图如图 5.11 所示。

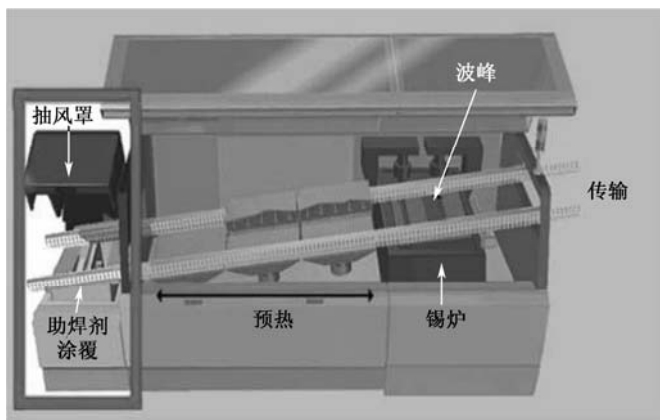


图 5.11 助焊剂涂覆系统示意图

在波峰焊接系统中设置助焊剂涂覆系统的目的,就是要实现将助焊剂自动而高效地涂覆到 PCB 的被焊面上去。

(2) 助焊剂涂覆系统的技术要求

评价一种助焊剂涂覆系统工作状况的优劣时,通常从所涂覆助焊剂层的厚度和均匀性的角度来考虑,即:

- ① 涂覆层应均匀一致,对被焊面的覆盖性好;
- ② 涂覆的厚度适宜,无多余的助焊剂流淌;
- ③ 涂覆效率高,在保证波峰焊接要求的前提下,助焊剂的消耗量最少;
- ④ 环保性能好。

2. 预热系统

(1) 预热系统的作用

预热系统(如图 5.12 所示)作为波峰焊接设备系统中的一个工位,在实际应用中有以下作用。

① 促使助焊剂的活性充分发挥。助焊剂在起作用之前,需要把助焊剂中的活化剂激活。然后,这些化学成分与基体金属表面的氧化物相互作用,使氧化物从基体金属表面清除。涂覆好助焊剂的 PCB 需要加热到激活温度才能发生这种反应,如松香基助焊剂需要加热到 104℃ 左右,并应在此温度下停留足够的时间,以保证助焊剂能充分净化 PCB 的被焊表面。如果



只依靠钎料波峰把助焊剂加热到活化温度,则要按照助焊剂能够清理好金属表面所需要增加的时间来延长 PCB 在波峰里停留的时间,这是极为不利的。

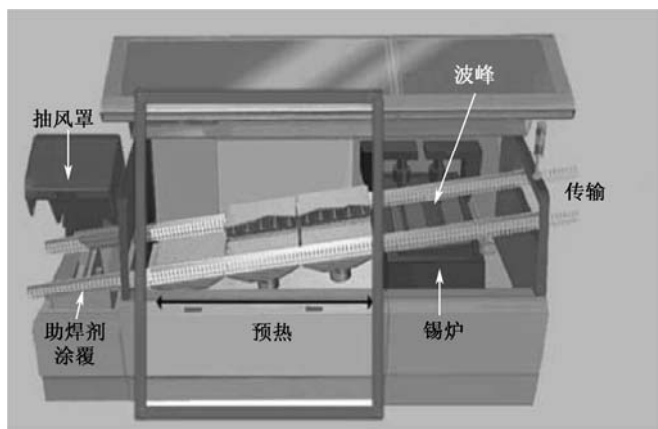


图 5.12 预热系统示意图

② 除去助焊剂中过多的挥发物来改善焊接质量。PCB 进入钎料波峰之前,大多数助焊剂中的挥发性材料仍与松香混在一起。某些有机酸助焊剂中还含有水分。如果在这种状态下直接进行波峰焊接,钎料槽的热度就会使溶剂迅速汽化,这不仅将使钎料本身产生喷溅现象,而且这些蒸汽会被截留在填充钎料中形成气孔。另外,大量溶剂挥发所消耗的汽化潜热,将使 PCB 焊接表面的温度急剧下降,从而导致虚焊、桥连、拉尖等焊接疵病的发生。

③ 减小波峰焊接时的热冲击。预热可使 PCB 的温度逐步均匀上升,从而将波峰焊接时的热冲击减至最小,缓和了热应力,使得 PCB 的翘曲和变形最小,并且改善了 PCB 的机械平整度。

④ 减小元器件的热劣化。由于采取了预先预热,使得波峰焊接时的热冲击可以降低到最小程度,进而可将热敏元器件损坏的危险程度降至最低。

⑤ 提高生产效率。预热处理还缩短了波峰焊接过程中把 PCB 加热到润湿度所需要的时间,从而加速了波峰焊接过程,提高了生产效率。

(2) 对预热系统的基本技术要求

对预热系统的基本技术要求如下。

① 温度调节范围宽,一般应在室温至 250℃ 范围内可调,以覆盖各种不同类型助焊剂的活化温度的要求。

② 应有一定的预热长度,以确保 PCB 在激活温度下保持足够的时间。该停留时间和温度是保证助焊剂适合净化被焊表面的重要参数。

③ 不应有可见的明火,以避免助焊剂液滴掉在发热元件上燃烧起火,引起火灾。

④ 对助焊剂涂覆系统正常工作的干扰及造成的热影响最小。

⑤ 耐冲击、振动,可靠性高,维修简便。



3. 夹送系统

(1) 夹送系统的作用

在波峰焊接中,夹送系统(如图 5.13 所示)的作用是使 PCB 能以某一较佳的倾角和速度进入和退出钎料波峰,以确保 PCB 上的每个焊点在钎料波峰中经历的时间为 3~5s,从而获得较好的焊接效果。



图 5.13 夹送系统示意图

(2) 夹送系统的技术要求

- ① 传送平稳、无抖动和振动现象,噪声小。
- ② 传送速度在某一给定范围内(如 0~3m/min)应连续可调,速度波动量应小于 $\pm 10\%$,力学性能好。
- ③ 夹送最好有一定的倾角,其范围可在 $4^\circ \sim 8^\circ$ 之间选择。
- ④ 夹持爪的化学稳定性能好,在助焊剂和高温液态钎料的反复作用下不熔蚀、不沾锡、不和助焊剂起化学反应、弹性好、夹持力稳定。
- ⑤ 装卸方便、维修容易。
- ⑥ 结构紧凑,对整机外形尺寸的影响小。
- ⑦ 热稳定性好、不易变形。
- ⑧ 可以很方便地根据 PCB 的不同宽度调节夹持的宽度。

4. 冷却系统

(1) 作用

设置冷却系统(如图 5.14 所示)的目的是迅速驱散经过钎料波峰区后积累在 PCB 上的余热。

(2) 技术要求

- ① 气流应定向,应不导致钎料槽表面的剧烈散热。
- ② 风压应适当,过猛易产生扰动焊点。



图 5.14 冷却系统示意图

当采用无铅钎料进行焊接时,由于无铅钎料的熔点通常比 Sn37Pb 高,而且实现完全相变的糊状区的温度范围也宽,在波峰焊接的温度下,铜导体和基板之间的黏附下降很多,再加上凝固过程的糊状区时间长,更易导致铜导体从基板上剥离。而且由于经历的凝固糊状区



时间过长,系统的任何机械振动都将引起焊点钎料表面起皱而出现凸凹不平。仅从这一点出发,国外有公司提出采用冷冻机进行急剧冷却,这对抑制焊缘起翘和细化晶粒是有好处的。笔者认为提高设备在运行过程中的平稳性和减少机械振动同样是重要的。

5. 电气控制系统

(1) 作用

波峰焊接设备的电气控制系统(如图 5.15 所示)的作用是对全机各工位、各组件之间的信息流进行综合处理,对系统的工艺过程进行协调和控制。它既是系统的控制中枢,也是衡量整机功能和先进性的重要判据之一,是影响系统可靠性和焊接效果的重要因素。

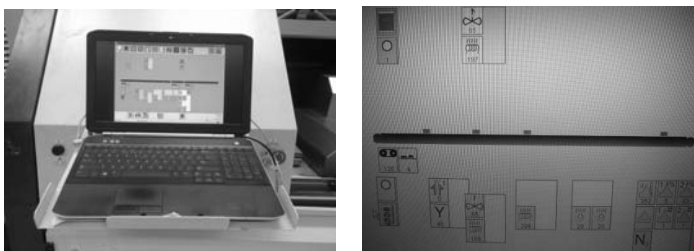


图 5.15 电气控制系统示意图

(2) 技术要求

电气控制系统决定了整机工艺过程的控制精度,直接影响着设备的可操作性和可维修性。因此,对电气控制系统性能的要求可归纳如下:

- ① 控制动作准确可靠;
- ② 能充分体现和反映波峰焊接工艺规范要求;
- ③ 人机界面友好,操作简便;
- ④ 可操作性和可维修性好;
- ⑤ 安全措施完善,容错功能强;
- ⑥ 成本低,维修备件货源广;
- ⑦ 能充分体现现代控制技术的进步和发展。

6. 钎料波峰发生器

(1) 作用

钎料波峰发生器(如图 5.16 所示)既是决定波峰焊接质量的核心,也是整个系统最具特征的核心部件,更是衡量波峰焊接系统性能优劣的重要判断依据。

(2) 技术要求

- ① 有优良的钎料波峰动力学特性。
- ② 波峰平稳,高度可调。

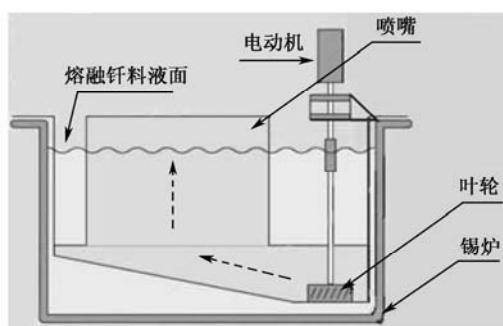
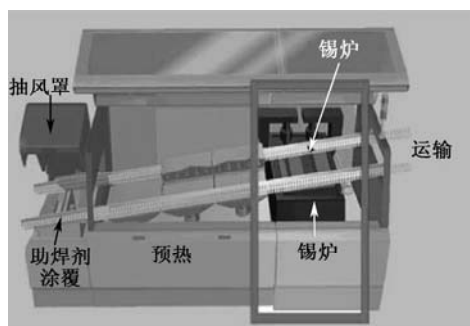


图 5.16 钎料波峰发生器示意图

- ③ 具备一定的抑制高温液态钎料氧化的能力，最好不要使用防氧化物质。
- ④ 在保证热容量的前提下，力求钎料槽容量较小。
- ⑤ 热工特性好，节能省电，且拥有完善的温度自动控制措施。
- ⑥ 钎料槽设计应使所有钎料均能处于循环状态中，从而保持钎料成分的高度均匀性，避免局部区域出现沉积熔析相的死角。
- ⑦ 加热器的设计和布置应使钎料受热均匀且无过热点。

7. 主要控制参数及指标要求

(1) 钎料槽温度

钎料槽温度是影响波峰焊接效果的一项关键参数，其指标要求大致可归纳如下。

- ① 温度可调范围：室温至 300°C 。
- ② 温度控制范围： $200\sim 280^{\circ}\text{C}$ 。
- ③ 温度控制精度： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 预热温度

- ① 温度可调范围：室温至 300°C 。
- ② 温度控制范围： $80\sim 270^{\circ}\text{C}$ 。
- ③ 温度控制精度： $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

预热温度通常是指 PCB 通过预热工艺区时，焊接表面上应达到的温度。由于 PCB 焊接面上的温度很难检测，而且该温度受周围环境气流因素的影响很大，所以预热显示的温度并不等于 PCB 焊接面经过预热区后实际达到的温度。显示温度与 PCB 焊接面实际达到的温度之间的差值与温度检测传感器的放置位置有很大的关系，操作者应根据具体的机型，在不同夹送速度和 PCB 类型的情况下，通过实验得出其相应的偏差校正值，然后再根据偏差校正值设置控制的显示值。

(3) 夹送速度

- ① 速度可调范围： $0\sim 3\text{m/min}$ 。
- ② 速度控制范围： $0.5\sim 2.5\text{m/min}$ 。
- ③ 速度控制精度： $\pm 5\%$ 。



(4) 助焊剂密度 (对松香基助焊剂而言)

- ① 密度可调范围: $0.8 \sim 0.9 \text{g/m}^3$ 。
- ② 密度控制范围: $0.82 \sim 0.88 \text{g/m}^3$ 。
- ③ 密度控制精度: ± 0.004 (20°C)。

8. 关键参数的定义和验收

所谓关键参数, 即对焊接效果有直接影响的机器性能指标, 主要有以下几项。

(1) 波峰阔度

① 定义: 当波峰高度处于正常工作高度 H_0 (如 $7 \sim 8 \text{mm}$), PCB (板厚为 d) 位于其上且压波峰的深度为 $2d/3$ 时, 沿传送方向 PCB 下表面与波峰接触的长度为波峰的阔度 W , 如图 5.17 和图 5.18 所示。

② 工艺要求: 当夹送系统的夹送速度取 $v=1.2 \text{m/min}$ 时, 要求阔度不小于 $40 \text{mm} \pm 10\%$ (焊接时间为 $1.8 \sim 2.2 \text{s}$)。

③ 测试方法: 将波峰高度调节至正常工作高度 H 上, 然后将带刻度的石英玻璃平板装夹在传送链上, 并将其运行至钎料波峰上调节好浸入深度, 观察其形状并测量其阔度, 如图 5.18 所示。

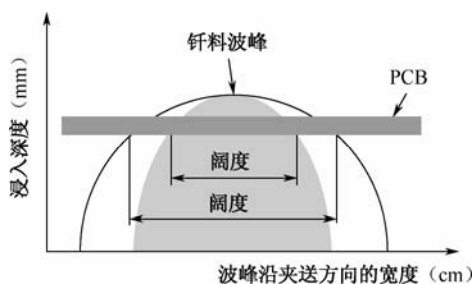


图 5.17 波峰阔度示意图

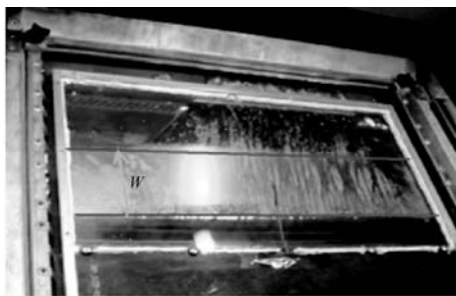


图 5.18 波峰阔度的测量

(2) 波峰的平整度

① 定义: 当波峰高度处于正常工作高度 H (如 $7 \sim 8 \text{mm}$) 时, 沿波峰阔度方向波峰高度分节的差异性。

② 工艺要求: 在正常工作波峰高度 H ($7 \sim 8 \text{mm}$) 上, 沿整个波峰阔度范围的不平度不大于 $10\%H$ 。

③ 测试方法: 利用刀口横架在整个波峰阔度上并保持与波峰喷嘴表面上平行, 微调波峰高度使其最高点刚好与刀口尺的刀刃相接触, 观测其沿整个阔度方向的最高点和最低点的高度差 h , 其值应不大于 $10\%H$, 如图 5.19 所示。

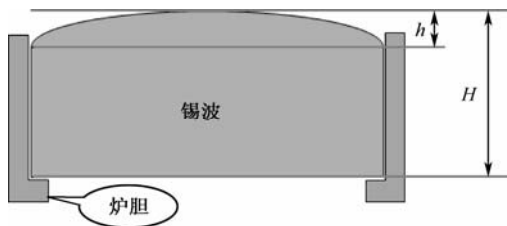


图 5.19 波峰平整度示意图



(3) 波峰稳定性

① 定义：当钎料波峰在正常的工作高度 H 下时，波峰幅度沿垂直方向上随时间的跳动量。

② 工艺要求：波峰沿垂直方向幅度的跳动量 $\Delta A \leq 5\%H$ 。

③ 测试方法：将波峰高度调节至正常工作的高度 H 上，然后将带有刻度的石英玻璃平板装夹在传送链上，将其运行至钎料波峰上调节好浸入深度，观测由于波峰高度的波动而导致玻璃平板上钎料波峰的进入线和脱离线之间阔度的变化。

(4) 夹送速度的精度和稳定性

① 定义：PCB 在导轨上的实际传送速度 (v_c) 与控制系统 CTR 上设定的速度 (v_0) 的差异 ($v_c - v_0$) 定义为夹送速度的精度；在某一时间段（如 30min）每段设定间隔时间（如 5min）测试的数据的精度变化量定义为稳定性。

② 工艺要求：夹送速度的精度为 $v_0 \pm 10\%$ ；30min 内的精度最大波动量应 $\leq (v_c - v_0) 10\%$ 。

③ 测试方法：可在下述两种方法中择一进行测试。

(5) 钎料槽温度的均匀性和稳定性

① 定义：钎料槽内波峰钎料和液面内各点之间的温度差异的大小 (ΔT) 即反映了钎料槽温度的均匀性。

② 工艺要求： $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$ 。

③ 测试方法。

- 温度均匀性：用温度分辨率不大于 0.5°C 的标准温度计直接测量并判断即可。
- 温度的稳定性：用温度分辨率不大于 0.5°C 的标准温度计，每间隔 10min 测取钎料槽内的温度值，连续 10 次，判断其数值的变化即可反映钎料槽温度的稳定性。
- 温度测量偏差：在显示屏上设置某一温度值 T_0 后，约过 20min 用标准温度计测量钎料槽内钎料的实际温度值 T_c ，比较其数值的差异，即反映了系统的温度测量偏差。要求 $|T_c - T_0| \leq 1^\circ\text{C}$ 。

5.5 波峰焊接工艺过程控制

5.5.1 工艺过程控制的意义

确保材料的质量和验证工艺，始终保持工艺过程的稳定，实行对缺陷的预防而不是发现，只有在这样的理念和运行环境下才能生产出质量稳定而可靠的产品。

传统概念认为波峰焊接控制主要是温度，因此通常选择严格的温度曲线。然而温度虽然是重要的，但它不能说明 PCB 与钎料波峰的相互作用。

没有 PCB 与钎料波相互作用的精确数据的波峰焊接过程，可能是造成连续发生缺陷的



原因。例如，调节预热器永远不能消除由于太长驻留时间引起的桥连，或者由于浸入深度太浅所引起的漏焊。最近研究试验的结果表明，现有的波峰焊接缺陷中的大多数只有通过对 PCB 与钎料波相互作用的直接测量与精确控制才能消除。许多工厂已经将工艺技术与简单的程序相结合，优化 PCB 的驻留时间、控制浸入深度，以得到波峰焊接工艺的真正可重复性。

5.5.2 基材可焊性的监控

为了达到波峰焊接过程的低缺陷率，PCB 和元器件的焊端表面涂层必须能经受焊接前的储存环境和时间及多次温度循环的考验而不退化，在焊接过程中润湿时间短，并能表现出持续、足够的可焊性。

(1) 控制库存期

按照有关标准规定，PCB 自出厂日期起的保存期限：纸质 PCB 为 3 个月，玻璃布质 PCB 为 6 个月。如果超过期限，应重新进行性能试验，合格或经适当处理后合格的才可继续使用。

(2) 防止操作污染

人体汗渍中的油脂和酸性物质会对基体金属造成严重污染，降低可焊性。指印是极难去除的，而且在湿度或环境试验中会在 PCB 上呈现出来。为了防止这种污染，在 PCB 组装过程中禁止用裸手或裸指接触 PCB，手握 PCB 组件时，应持其边缘。

5.5.3 波峰焊接设备工序能力系数 (C_{pk}) 的实时监控

1. 波峰焊接设备工序能力系数 (C_{pk}) 的定义

波峰焊机的设定参数并不反映波峰焊机的可变化性，所有波峰焊机均有其自己的数据变化和可重复性的正常范围。这只有通过将机器保持在使用的每个设定值时，对驻留时间和浸入深度的测量来确定。理解波峰焊机的驻留时间、浸入深度和平行度的工艺窗口，将有助于优化对每一个不同类型的 PCB 的波峰焊接工艺。

尽管温度控制、波峰焊接设备、助焊剂和钎料合金等技术在不断发展和进步，在波峰焊接过程中还可能出问题。这是因为实际的挑战是波峰焊接工艺过程控制的本身，波峰焊机本身不能测量板与波的相互作用。

波峰焊接设备的工序能力系数 C_{pk} 如何来定义呢？应该这样来理解：在保持机器设定参数（钎料槽温度、预热温度、夹送速度、夹送倾角、助焊剂涂覆量等）为定值的情况下，驻留时间、浸入深度等参数相互作用的稳定能力。

2. 驻留时间和浸入深度概述

(1) 驻留时间

驻留时间是一个引脚滞留在钎料波峰内的时间长短。通过对波峰焊接过程中 PCB 发生



的缺陷率与不同驻留时间影响的研究表明,对每一种特定的 PCB 都存在一个焊接效果最佳的驻留时间,缺陷率随驻留时间的不同而显著变化。

传送带速度的设定将不能单独控制在钎料波峰上的驻留时间,必须有精确测量与控制的浸入深度相配合。因为浸入深度的变化意味着接触长度的变化,结果将导致驻留时间不受控。

需要对每种不同类型的 PCB 进行直接测量与管理,因为对不同类型的 PCB 使用相同的波峰焊机设定参数是不可能获得最佳的波峰焊接效果的。

(2) 浸入深度

浸入深度是 PCB 浸入钎料波峰内的深度。改变浸入深度会改变接触长度和驻留时间,这使得浸入深度的直接和准确测量成为关键。PCB 的实际浸入深度决定于几个因素:钎料槽在设备中安装位置的高度、传送带上的指爪弯曲变形、传送带倾角,以及是否使用托盘等。不同类型的 PCB 有不同的最适宜的浸入深度。

与不同类型的 PCBA 在再流焊接中有不同的炉温曲线一样,不同类型的 PCBA 在波峰焊机中也有自己的单板与波峰的互动参数。

3. 监控方法

假设波峰焊接过程中的 PCB 与波峰是平行的,则 PCB 与钎料波峰相互作用的参数均可直接准确地测量。

① 驻留时间的监控:可采取用带刻度的石英玻璃平板直接测量,并记录读数。

② 浸入深度:可采用薄片钢尺直接测得(注意,钢尺的放置位置和方向不能干扰波峰流态),并记录读数。

③ 将待焊的 PCB 装入传送带内进行波峰焊接,然后任抽取 20 块已焊好的 PCBA 进行检测,记录每块板发生的焊接缺陷数并按 DPMO 要求换算成 ppm 值。

④ 确定符合质量标准要求的 ppm 值(如 500)。

⑤ 按 SPC 数字控制的统计计算规定,计算设备的实际工序能力系数 C_{pk} 。

上述方法所检测、跟踪和分析的目的,均是确定 PCB 在钎料波峰上的互动能力,并运用 SPC 的统计分析方法得出设备实际的 C_{pk} ,要求其范围应符合 $1.33 \leq C_{pk} \leq 1.67$ 。

这些数据的获得能够使我们提前发现设备能力的恶化趋势,及时制订设备的维护计划,确保产品焊接质量的稳定。

5.5.4 助焊剂涂覆的监控

成功的波峰焊接,助焊剂涂层必须是均匀的,且在厚度上是受控的。为了能让助焊剂有等地渗入孔内和涂覆在引脚上,在助焊剂喷雾装置之后配置有空气刀,它可驱动助焊剂渗入孔内,使助焊剂分布更均匀及去掉过量的助焊剂。空气刀可以提供确保在要焊接的表面上均匀施用助焊剂量的正确受控方法。



5.5.5 波峰焊接温度曲线的监控

波峰焊接设备的设置参数: 预热温度和时间、钎料槽温度和夹送速度等的工艺过程控制, 可以通过波峰焊接温度曲线进行综合性的动态监控来实现。

1. 预热温度和时间

(1) 预热不足的危害

对于任何助焊剂, 不足的预热时间和温度将造成较多的残留物, 或因活性不足造成润湿性不良, 因溶剂挥发不充分造成波峰钎料珠飞溅。特别是对于低挥发性的水基助焊剂而言, 在进入波峰前若没有提供足够的预热来蒸发水分, 钎料珠飞溅现象将更为严重。

(2) 过度预热的隐患

助焊剂在波峰上的出现有助于降低波峰钎料的表面张力, 过分的预热时间和温度将导致助焊剂在进入波峰之前就过量地消耗。由于助焊剂作用的失去, 可能造成桥连和拉尖等不良现象的发生。

最佳的预热温度和时间能使波峰上留下足够的助焊剂, 以在 PCB 退出波峰钎料时, 使液态钎料能顺利地 from PCB 的金属表面剥离, 多余的钎料被拖回钎料槽。大多数有资质的助焊剂供应商, 都能向用户推荐相应型号助焊剂的温度上升率和最大/最小顶面与底面的预热温度值。

2. 钎料波峰和焊接温度

在波峰焊接工艺中, 当各种影响因素, 如设计 DFM、元器件和 PCB 的可焊性、助焊剂的适配性、夹送系统的稳定性等的控制都到位时, 钎料波峰的形态和形成连接所需要的温度等就成为影响焊接效果的关键因素。因此, 在工艺操作开始之前, 要特别关注对焊接工位的保养和维护。例如, 钎料槽中有没有因钎料渣的堵塞而造成第二波峰(平波)缺口、不平, 跳动等, 因为一个平整的水平主波峰对确保焊接质量而言是非常关键的。而第一波峰(片状波峰)具有较高速度的紊流状态提供了垂直与水平的压力, 有利于钎料对焊接底面的浸透。

当使用 Sn37Pb 共晶合金时, PCB 波峰焊接面上的钎料温度应该是连续一致的, 且保持在 238~260℃的范围, 往这个范围的较低方向取值有时是有益的。免洗助焊剂经常以这个范围的最低或稍微更低的温度焊接, 以确保 PCB 在与钎料波峰的剥离区处仍有助焊剂的存在。一些使用其他助焊剂的工艺, 通过提高预热来达到 PCB 较高的顶面与底面温度, 并将钎料波峰温度进一步降低至 220℃, 这在某些应用中也取得了成功。

5.5.6 波峰焊接中钎料槽杂质污染的危害

1. 污染的来源

不论是有铅钎料还是无铅钎料的波峰焊接, 钎料槽中的杂质主要是从浸入钎料槽中的被



焊基体金属（元器件引脚及 PCB 焊盘）上溶入的，这意味着在波峰焊接中，只有有限的几种元素（Cu、Ag 和 Au）能够溶于钎料槽的钎料中。

2. 污染的危害

（1）对有铅焊接质量的影响

元素 Cu、Ag 和 Au 对于有铅钎料波峰焊接而言均属于杂质金属，它们对波峰焊接效果的影响极大。其含量超标时对焊点性能的主要影响如下。

Cu: Cu 与 Sn 可生成 Cu_3Sn 、 Cu_6Sn_5 两种金属间化合物，使液态钎料呈砂性且流动性变差，焊点变脆。

Ag: Ag 和 Sn 可生成 AgSn 和 Ag_3Sn 两种金属间化合物，使钎料呈砂性和被焊表面出现小疙瘩，焊点失去自然光泽，并出现白色颗粒状物。

Au: Au 与 Pb 生成 Au_2Pb 和 AuPb_2 金属间化合物，与 Sn 生成 Au_6Sn 、 AuSn 、 AuSn_3 和 AuSn_4 等金属间化合物，很快使焊点变脆，并形成暗色的颗粒状轮廓线。

Au 和 Cu 发生复合作用会很快破坏整个钎料槽中的钎料性能。

对钎料合金有害的污染物还有铁、铝、镁、镉和锌等。特别是锌，它是一种最有害的污染物，即使含量少到 0.005% 也会引起砂砾状、缺少附着力，甚至使焊点完全破坏，导致整槽钎料报废。

（2）对无铅焊接质量的影响

目前在无铅波峰焊接中所用的钎料，最常用的是 SAC（SnAgCu）、SnCu 等合金。因此，除杂质元素 Au 外，此时 Ag、Cu 均为主要构成成分而不能称为杂质。在应用中不是如何除掉它们，而是如何控制其在正常的成分范围内不要超标。

① 当 Cu 的成分超过 1.5wt% 时，屈服强度会降低，抗拉强度保持稳定，整体合金的塑性在 Cu 成分为（0.5~1.5）wt% 范围内是较高的，然后随着 Cu 的进一步增加而降低。

② 对于 Cu 含量为（0.5~0.7）wt% 的 SAC 合金，Ag 从 3.0wt% 增加到更高的水平（如 4.7wt%）时，将增加 Ag_3Sn 粒子的体积比例，从而得到更高的强度，但不会再增加疲劳寿命。

如前所述，Ag 是 SAC 合金中最贵的部分，和低 Ag 合金相比，高 Ag 合金在工艺性、可靠性及供应方面没有什么明显的优点。有人认为含 Ag 量高的合金有助于提高润湿性，但是润湿试验表明，含 Ag 量低的合金实际上比含 Ag 量高的合金润湿性更强。

5.5.7 防污染的对策

1. 有铅

（1）污染容限

钎料槽中的钎料合金纯度对焊点质量和一致性的影响极大。因此，为了获得好的质量和经济性，第一次向钎料槽中加注钎料时应选用纯度最高的钎料。美国工业部门根据多年的生产经验和工业生产中遇到的问题，针对波峰焊接钎料的污染水平规定了一个粗略的指导原



则，如表 5.2 所示。

表 5.2 波峰焊接用 Sn37Pb 按质量百分数表示的污染水平

元素	典型分析数据 (wt%)		经验观测数据 (wt%)	
	原生钎料中的含量	ASTM 或 QQ-S-571 规定的最高含量	记录的出质量问题的杂质含量	建议更换钎料的含量
Cu	0.002~0.020	0.080	0.200~0.500	0.300~0.350
Au	0.001	0.080	0.080~0.300	0.100~0.200
Pb	0.005	0.005	0.005~0.010	0.005
Cd	0.001	0.001	0.008~0.020	0.001~0.005
Zn	0.005	0.005	0.005~0.020	0.005

(2) 防污染对策

① 尽可能缩短焊接时间或降低焊接温度。

② 遮蔽不要求焊接的金属表面（如使用阻焊膜）。

③ 用高纯度的钎料补充钎料槽中钎料的耗损。

④ 禁止将钎料的边角余料和滴落钎料（Drip Pings）重新加入钎料槽内（因从工件上滴落的钎料中，金属杂质含量高）。

⑤ 若已证明钎料污染是产生质量问题的主要原因，必须整槽钎料完全更新，在更新过程中应用软毛刷清除黏附于钎料槽壁上的任何非金属浮渣和原有的钎料，且不得使用硬金属丝制成的刷子，以避免新的污染。

⑥ 铜锡化合物的凝固温度比 Sn37Pb 钎料的熔点高 5~10℃，可把钎料槽温度降到铜锡化合物的凝固点，再用特制的工具把铜锡结晶生成物舀出加以清除，然后再用纯度高的原生态钎料对钎料槽进行补充，这样便进一步稀释了钎料槽中杂质 Cu 的浓度水平，从而可在积累、清除和稀释之间达到某种动态平衡。此法虽不能把全部的杂质铜清除，但在工业应用中确实是大大延缓杂质金属积累的一种有效的方法。

⑦ 银也可采用上述清除杂质铜的方法清除。

2. 无铅

(1) 污染容限

例如，SAC305 无铅钎料合金的成分和污染的最大容限如表 5.3 所示。

表 5.3 SAC305 无铅钎料合金的成分及污染的最大容限 (wt%)

元素	Sn	Ag	Cu	Pb	Sb	Bi	Zn	Fe	Au	Al	As	Cd
含量 (wt%)	余量	3.00	0.50	0.030	0.01	0.01	0.001	0.002	0.080	0.001	0.010	0.001
最大容限 (wt%)	余量	3.50	1.50	0.100	0.1 (0.05)	0.10	0.001	0.020	0.200	0.010	0.030	0.002



(2) 防污染对策

① 对于无铅波峰焊接用钎料 (SAC、SnCu)，在钎料槽中 Ag 的积累只有当 PCB 的可焊性涂层采用 Im-Ag 时才有可能，然而由于 Im-Ag 层很薄，故溶入钎料槽的量非常有限，而且用低 Ag 的 SAC 钎料作为钎料槽的消耗补充，很容易让其达到动态平衡。

② 对于 Cu 则不一样，由于无铅焊接温度高，而且钎料均属于高 Sn 合金，这两个因素综合作用的结果，使得在焊接工艺过程中钎料槽中的 Cu 将快速积累。

③ 对 Sn 和 Sn1.2Ag 钎料合金来说，Cu 含量对液相线温度的影响如图 5.20 所示。含 Cu 大约在 1wt% 的水平上每增加 0.2wt%，液化线温度约增加 6℃，这样的温度变化会使波的动力学性能变差，焊接缺陷率上升（如桥连）。当钎料槽中的 Cu 累计积累到 1.5wt% 时，就必须更新钎料槽中的全部钎料才能确保焊接效果，在经济上这是一笔沉重的负担。

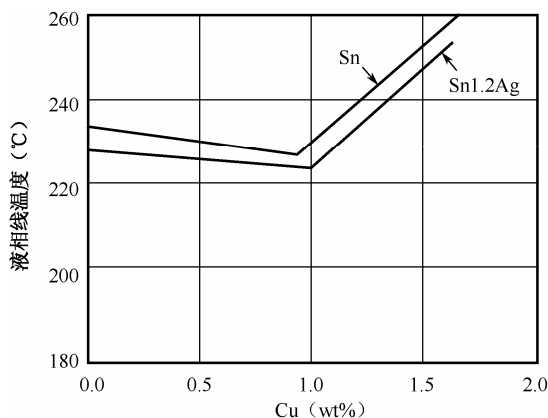


图 5.20 Cu 含量对液相线温度的影响

(3) 无铅波峰焊接中 Cu 的积累及抑制

由于无铅钎料均属于高 Sn 基合金，所以在熔融状态下对 Cu 的溶解能力更强了。再加上无铅波峰焊接过程中钎料槽的工作温度与 Sn37Pb 相比高 10~20℃，因此溶蚀 Cu 的能力也成倍增加了。这样，无铅波峰焊接必须解决钎料槽中 Cu 成分的快速积累的问题。

解决上述问题的比较经济的办法，就是在无铅波峰焊接过程中，对钎料槽中 Cu 的积累和消耗建立某种动态平衡。其实施的技术途径大致如下。

- ① 第一次填充入钎料槽的钎料必须是纯度最高、质量最好的钎料合金。
- ② 在工艺规定的钎料温度和焊接时间下，让设备连续工作某一段时间（如 8h）或连续焊接某数量的 PCBA（如 1000 块）后，测定钎料槽中 Cu 成分的增量 ΔCu 。
- ③ 在上述过程中，同时在钎料槽中发生了下述两个现象。
 - 随着 PCB 通过钎料槽，Cu 元素不断溶入，导致钎料槽中 Cu 的含量不断增大。
 - 随着设备的不间断运行，钎料槽中的钎料被每个焊点不断带出，因此，钎料槽中熔化钎料的液面不断降低，从而要求不断地用新钎料补充钎料槽使其恢复到应有液位。由于为保持钎料槽液面而加入的新钎料含 Cu 量少（甚至不含 Cu），所以该稀释作用使得钎料槽中的钎料的 Cu 含量不断降低。
- ④ 通过试验和计算，可以确定用作钎料槽补充用的新钎料中应含 Cu 的百分数。



⑤ 当 Cu 溶入的速度和被焊 PCB 带出钎料槽中的 Cu 及新补充的钎料的稀释作用相互抵消时, 钎料槽中 Cu 的含量便达到了动态平衡, 从而使钎料槽中的 Cu 含量始终运行在某一稳态水平上。

5.6 波峰焊接常见焊点缺陷及防治措施

波峰焊接过程是产生 PCBA 组件缺陷的主要工序, 在整个 PCBA 组装过程中, 由它引起的缺陷率高达 50%。波峰焊接过程中出现的缺陷是前工序制造中存在问题的集中表现。本节重点讨论有铅波峰焊接和无铅波峰焊接所共有的缺陷现象。这些共性的缺陷主要表现为虚焊、冷焊、拉尖、桥连、金属化孔填充不良、针孔、吹孔、钎料珠、钎料球等。

5.6.1 虚焊

1. 定义

焊点表面呈粗糙的粒状、光泽性差、流动性不好是虚焊的外观表现。从本质上讲, 凡是在焊接过程中在连接接头的界面上未形成合适厚度的合金层 (IMC) 就可以判定为虚焊, 如图 5.21 所示。此时若将焊点撕裂, 就可发现在基体金属和钎料之间没有任何相互楔入的残留物, 界面平整清晰, 好似用浆糊粘住的一样。而正常焊点被撕裂后, 钎料和基体金属之间有相互成犬牙交错状的裂痕, 即基体金属上有钎料残留, 钎料上也有基体金属的痕迹。

2. 现象

连接界面既未发生润湿又未发生扩散, 好似用浆糊粘住似的, 焊点表面呈粗糙的形状、光泽性差、接触角 $\theta > 90^\circ$, 如图 5.21 所示。此时钎料和基体金属接合界面之间为一层不可焊的薄膜所阻挡, 界面层上未能发生所期望的冶金反应, 这是一种显形的虚焊现象, 从外观上就能判断。

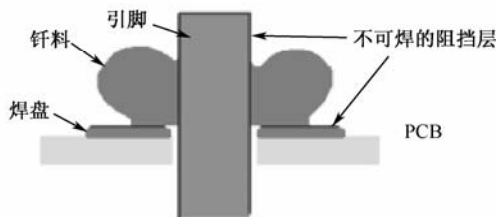
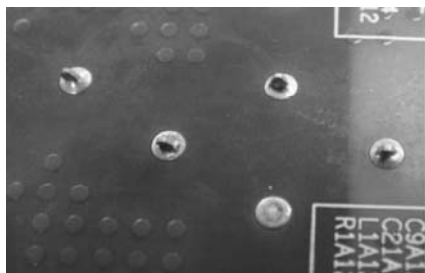


图 5.21 虚焊现象

3. 抑制措施

- ① 确保外购 PCB、元器件等的可焊性合格, 进入用户库房前必须进行严格的入库验收



试验；防止基体金属表面不洁净，表面氧化或被脏物、油脂、手汗渍等污染而导致表面可焊性差甚至不可焊。

② 优化库存期的管理，防止 PCB、元器件等的焊盘在库存期间发生基体金属表面氧化或脏污。

③ 对于库存超期的元器件和 PCB，经过可焊性测试合格后方可继续装机使用。

5.6.2 冷焊

1. 定义

在波峰焊接的接合界面，虽然发生了润湿但未发生所要求的扩散过程，接合界面合金层（IMC）形成不明显，即可定义为冷焊。

2. 现象

表面看似润湿，但钎料和基体金属的接合界面未发生冶金反应，未形成适当厚度的合金层（IMC），如图 5.22 所示。它表明了 PCB 及元器件的可焊性不存在问题，出现此现象的根本原因是焊接的工艺条件选择不合适。它是一种隐形的缺陷现象，从外观不易判断，因而危害极大。出现此现象的根本原因是焊接过程中的热量供给不足，或者是与波峰接触的时间过短。

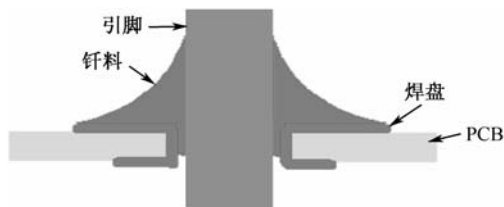


图 5.22 虚焊现象

3. 抑制措施

① 调整焊接温度和时间。

② 改善 PCB 设计，尽力避免波峰焊接时出现明显的热量陷阱。

③ 工艺规范选择不当，是造成冷焊现象的关键因素。因此，在钎料槽温度取定为 250℃ 的前提下，必须确保合金化的时间在 3~4s 之间。

5.6.3 拉尖

1. 现象

波峰焊接后在元器件和零件引脚顶端或焊点上发现有呈钟乳石状或冰柱形的钎料，称为拉尖，如图 5.23 所示。



图 5.23 拉尖现象

2. 形成原因

- ① 基板的可焊性差，焊盘氧化、污染。
- ② 助焊剂用量少，预热不当，钎料槽温度低，夹送速度不合适、焊接时间过短或过长。
- ③ 铜箔面太大。
- ④ 钎料纯度变差，杂质容量超标。

在波峰焊接时，从拉尖的形状大致可以知道钎料槽的温度及夹送速度是否合适。当拉尖有金属光泽且呈细尖状时，不是钎料槽的温度低就是夹送速度过快；而当拉尖呈圆、短、粗而无光泽状态时，则原因正好与上述完全相反。

3. 抑制措施

- ① 净化被焊表面。
- ② 调整 and 优选助焊剂；合理选择预热温度、钎料槽温度及夹送速度。
- ③ 钎料槽中的铜含量应控制在 0.3% 以下。
- ④ 基板上的大铜箔面，可用阻焊膜（绿油）将其分隔成尺寸约为 $3 \times 10\text{mm}$ 的区块来改善。

5.6.4 桥连

1. 定义

过多的钎料使相邻导体（特别是不等电位导体）之间连通起来的现象统称为桥连。

2. 现象及影响因素

（1）密间距插件的相邻两引脚之间桥连

这通常是由于两引脚之间的焊盘间距过小，或引脚伸出 PCB 板面的长度过长引起的，如图 5.24 所示。

（2）多芯接点间的横向桥连

这主要是由于钎料波峰中的锡流出现横向的扰动引起的，如图 5.25 所示。

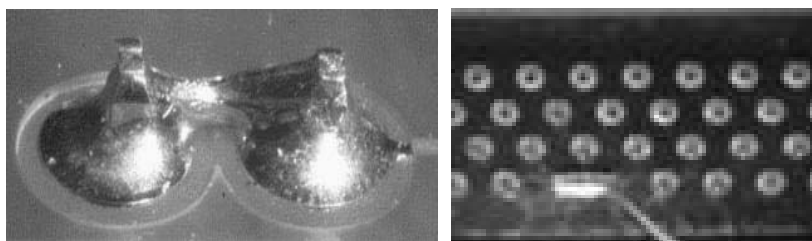


图 5.24 密间距插件的相邻两引脚之间桥连

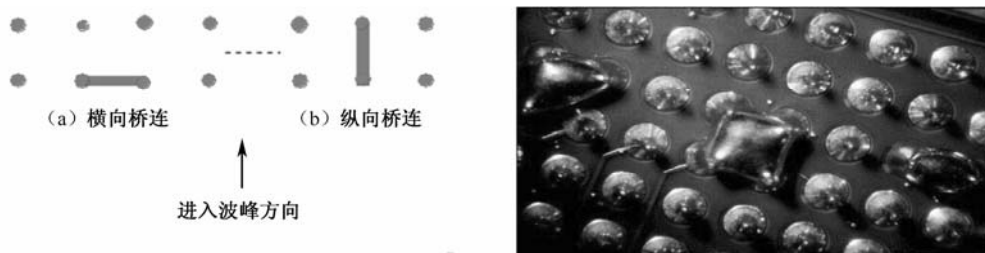


图 5.25 多芯接点间的横向桥连

(3) 在 SMA 波峰焊接中由于高大元件阻挡造成液态钎料回流形成桥连

SMA 波峰焊接中因高大元件阻挡的桥连如图 5.26 所示。

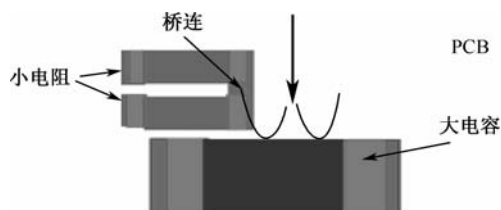


图 5.26 SMA 波峰焊接中因高大元件阻挡的桥连

(4) 由于 SMT 焊盘间距设计不当造成的桥连

SMT 焊盘间距过近的桥连如图 5.27 所示。

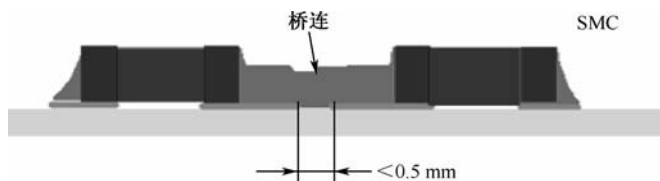


图 5.27 SMT 焊盘间距过近的桥连

3. 抑制措施

在工业生产运行中，具体构成对桥连现象的直接或间接的各种影响的因素是多种多样的，如钎料波峰的波形、钎料波峰的平整度、液态钎料的温度、相邻导体间的间距、基体金属表面的净度、钎料的纯度、助焊剂的活性、引脚伸出板面的高度、操作时的夹送角度、PCB



压入波峰钎料的深度等。在实际的生产过程中,应根据桥连现象的类别采取相应的抑制措施。

5.6.5 金属化孔填充不良

1. 现象

金属化孔填充不良是波峰焊接中的高发性缺陷。X-RAY 检测设备中观察到的金属化孔填充不良现象如图 5.28 所示。

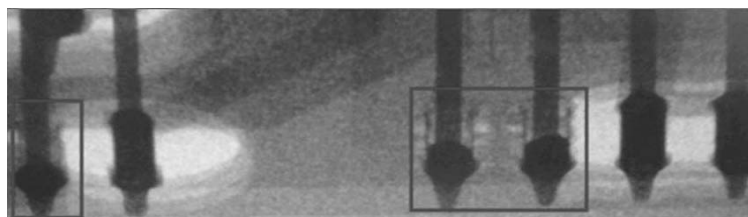


图 5.28 X-RAY 检测设备中观察到的金属化孔填充不良现象

(1) IPC-A-610 2、3 级要求

IPC-A-610 对金属化孔引线焊接质量的最低可接收条件如图 5.29 所示,其具体数据要求如表 5.4 所示。

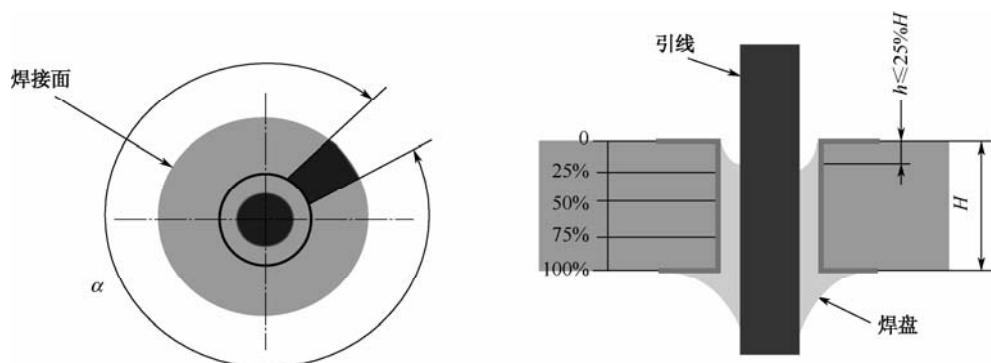


图 5.29 IPC-A-610 对有引线的金属化孔的填充性要求

表 5.4 金属化孔引线焊接质量的最低可接收条件

规定	2 级要求	3 级要求
元件面: 引线和孔壁润湿范围	180°	270°
孔内钎料充满的程度 (占孔总深度的百分比)	75%	75%
焊接面: 焊点润湿范围 (α)	270°	330°
元件面: 焊盘被钎料润湿的比例	0	0
焊接面: 焊盘被钎料润湿的比例	75%	75%



2. 影响因素

- ① 可焊性不良。
- ② 引脚和通孔的孔径不匹配。
- ③ 锡波高度不足。
- ④ 热量供给不足。

3. 抑制措施

- ① 改善基体金属的可焊性。
- ② 选择合适的焊盘封装，引脚和通孔的孔径需相匹配。
- ③ PCB 浸入钎料波峰一定的深度而使孔隙内获得一定的向上压力，这对钎料对孔隙的填充过程有利。
- ④ 对于热容量存在差异的元器件和 PCB，需要设计相应的炉温曲线以保证热量的供给。

5.6.6 针孔和吹孔

1. 现象

针孔与吹孔的区别是：针孔是在焊点上出现的小孔，其内部通常是空的；而吹孔则是焊点内部空气完全喷出而形成的可看到内部的大孔，分别如图 5.30 和图 5.31 所示。

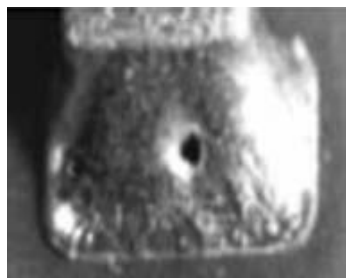


图 5.30 针孔

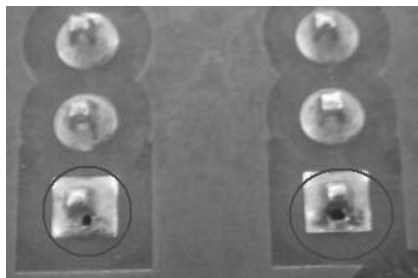


图 5.31 吹孔

2. 影响因素

- ① 焊盘周围氧化或有毛刺。
- ② 焊盘不完整。
- ③ 引线氧化、有机物污染、预处理不良等都可能产生气体而造成针孔或吹孔。
- ④ 焊盘或引脚局部润湿不良。
- ⑤ 基板有湿气：如使用较便宜的基板材质，或使用较粗糙的钻孔方式而导致在贯通孔处容易吸收湿气，在焊接热作用下蒸发出来。
- ⑥ 电镀溶液中的光亮剂：使用大量光亮剂电镀时，光亮剂常与金属同时沉积，遇到高温则挥发，特别是镀金层。



- ⑦ 生产场地的卫生条件差。

3. 抑制措施

- ① 改善 PCB 的加工质量。
- ② 改善焊盘和引线表面的洁净状态和可焊性。
- ③ 基板与元器件引脚污染源，可能由于元器件引脚成型、插件过程或储存状况不佳造成，用溶剂清洗即可。但如果发现污染物为硅有机物，因其不容易被溶剂清洗，故在制程中应考虑其他代用品。
- ④ PCB 在 120℃烘箱中预烘两小时，以消除基板中的湿气及镀孔内的残余药水。

5.6.7 钎料珠和钎料球

1. 现象

钎料珠：焊盘间的绝缘表面溅有小的钎料颗粒，称为钎料珠，如图 5.32 所示。钎料珠可能影响电子产品的正常工作，甚至造成重大事故。

钎料球：波峰焊接后在 PCB 上残留有较大尺寸的钎料珠，将其称为钎料球，如图 5.33 所示。



图 5.32 钎料珠

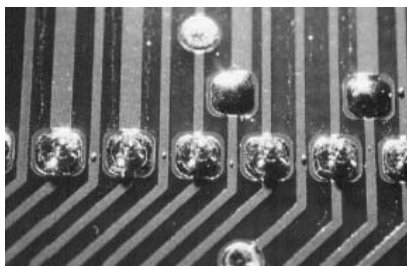


图 5.33 钎料球

2. 影响因素

- ① PCB 在制造或存储中受潮。
- ② 环境湿度大，潮气在多缝的 PCB 上凝聚，厂房内又未采取驱潮措施。
- ③ PCB 和元器件拆封后在线滞留时间过长，增加了吸潮机会。
- ④ 镀层和助焊剂不相溶，助焊剂选用不当。
- ⑤ 漏涂助焊剂或涂覆量不合适，助焊剂吸潮夹水。
- ⑥ 阻焊层不良，沾附钎料残渣。
- ⑦ 基板加工不良，孔壁粗糙导致槽液积聚，PCB 设计时未作热分析。
- ⑧ 预热温度选择不合适。
- ⑨ 镀银件密集。
- ⑩ 钎料波峰形状选择不合适。



3. 抑制措施

- ① 改进 PCB 制造工艺, 提高孔壁的光洁度, 改进 PCB 包装工艺和存储环境条件。
- ② 尽可能缩短在线的滞留时间, 从 PCB 开封→安装元器件→波峰焊接应在 24 小时内完成, 特别是在湿热地区, 这一点尤为重要。
- ③ PCB 上线前预烘, PCB 布线和安装设计后应作热分析, 避免板面局部形成大量的吸热区。
- ④ 安装和波峰焊接的场地温度应保持在 $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不应超过 65%。
- ⑤ 正确选择助焊剂, 特别是助焊剂所用溶剂的挥发速度要合适。
- ⑥ 合理选择预热温度和时间。温度过低、时间过短, 助焊剂中的溶剂不易挥发, 残留的溶剂过多时进入波峰后温度会急剧升高, 溶剂剧烈挥发, 在熔融钎料内形成高压气泡, 爆喷后大量形成钎料珠。
- ⑦ 尽可能采用辐射和对流复合预热方式, 加速 PCB 孔内溶剂的挥发。
- ⑧ 加强助焊剂的管理, 避免运行过程中的吸潮, 控制好助焊剂的涂覆量。
- ⑨ 设计上应尽量避免大量采用镀银的引脚, 因为过量的银在波峰焊接中易产生气体。
- ⑩ 钎料波形设计应保证在钎料溅落过程中不发生过剧的撞击运动, 避免因撞击击出小钎料珠。

5.6.8 芯吸现象

1. 现象

钎料从焊接处向引脚上部流走, 造成焊点部钎料不足, 如图 5.34 所示。若钎料上吸后在元器件弯脚处积聚, 但没有接触组件体, 则此现象是可以接受的。



图 5.34 芯吸现象

2. 影响因素

元器件引脚根部的升温速率比焊盘快。

3. 抑制措施

强化对基板的预热效果, 改善焊接过程中升温速率的均匀性。



5.6.9 缩孔

1. 定义

在无铅波峰焊接中，不时发现焊点表面出现微缩孔，如图 5.35 所示。

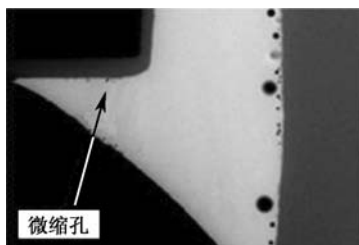


图 5.35 无铅焊接中的缩孔现象

2. 影响因素

由于镀铜过孔和 PCB 基材之间材料的热膨胀系数 (CTE) 不匹配，不同的热膨胀率使焊接连接处出现变形，这种动态变形过程主要集中在焊盘区域，使得焊盘在焊接过程中上下移动而引发焊点裂缝。

3. 抑制措施

在选用 PCB 基材时，要充分研究和关注 CTE 的匹配性。




思考题

1. 在波峰焊接过程中，助焊剂涂覆的作用是什么？如何解释被焊表面金属氧化膜的存在对润湿效果的影响？
2. 在波峰焊接过程中，有铅 Sn63Pb37 钎料的熔点为 183℃，则锡炉设置温度只要稍高于这个温度就可以了吗？
3. 在波峰焊接中如何判定金属化孔填充不良？其影响因素和抑制措施是什么？

第6章 局部焊接技术



本章要点

-  掩膜波峰焊接技术
-  选择性波峰焊接技术
-  其他局部焊接技术简介



6.1 掩膜波峰焊接技术

6.1.1 掩膜波峰焊接技术特点

掩膜波峰焊接是指在进行波峰焊接前,使用特定材料制作而成的掩模板承载 PCB,从而实现对 PCB 底部元器件的保护,使得 PCB 在经过钎料波峰时只对特定的器件完成焊接的局部焊接技术,如图 6.1 所示。

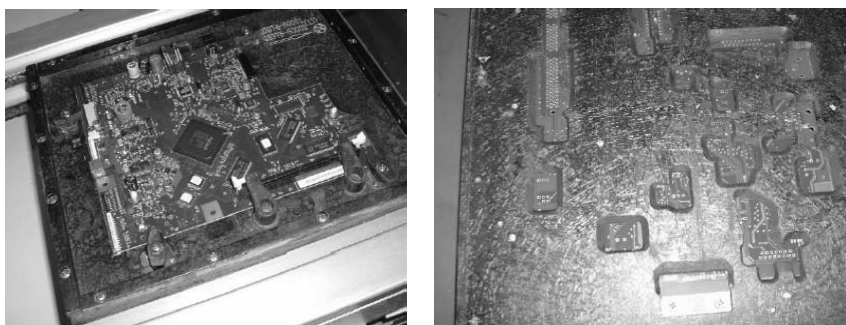


图 6.1 掩膜波峰焊接技术

掩膜波峰焊接技术的特点如下。

① 能完成复杂组装 PCB 的通孔类器件的焊接,焊接的一致性好。对于复杂的双面多层板,其元器件布局紧密,小型贴片元件及小封装 IC 较多,而板面上的大电容、连接器等通孔类器件如果使用通孔再流焊接技术则无法达到焊接强度要求。通过掩模板的设计可对贴片类器件进行保护,采用波峰焊接设备可对通孔器件进行焊接。

② 生产成本低。对比选择性波峰焊接技术,掩膜波峰焊接只需要采用波峰焊设备即可完成,不需要配制高成本的选择性波峰焊接设备。另外,由于一些 PCB 上有部分器件会因结构需要而伸出板边,一般需要给 PCB 设计更宽的工艺边才能在生产中进行夹持和传送。对于此类 PCB,可以通过设计掩模板来达到夹持传送的目的,减少 PCB 工艺边的成本。

③ 生产效率高。对比其他的局部焊接技术,掩膜波峰焊接只需要制作掩模板即可在波峰焊接设备上生产,而且通过对掩模板的设计,能实现多拼过板,能极大地提高生产效率。

6.1.2 掩模板材料分类及特性

掩模板的功能在于承载和保护 PCB 底部的元器件,以及对 PCB 进行夹持,防止单板在波峰焊接过程中受热变形,并有辅助支撑和定位的作用。因此,掩模板的材料必须能承受高温,具有良好的抗热冲击及耐腐蚀、不吸潮的能力。目前采取的掩模板材料一般有玻纤材料、合成石、钛合金等,其特性如下所述。



1. 玻纤板特性

其优点是具有良好的耐热性，最高能耐 300℃ 的高温；有良好的加工性，机械强度高，平整度好；不吸潮，在湿态下的电气性能好；阻燃。其缺点是长期使用后容易分层，不耐强酸和强碱，耐腐蚀性较差，使用寿命相对较短。玻纤材料掩膜板如图 6.2 所示。



图 6.2 玻纤材料掩膜板

2. 合成石板特性

其优点是具有良好的耐热性，最高能耐接近 400℃ 的高温；具有良好的热传导性，使得热量在板面均匀分布；具有很高的弹塑性和抗冲击性；耐腐蚀性能好，使用寿命较长。其缺点是价格较贵。合成石材料掩膜板如图 6.3 所示。

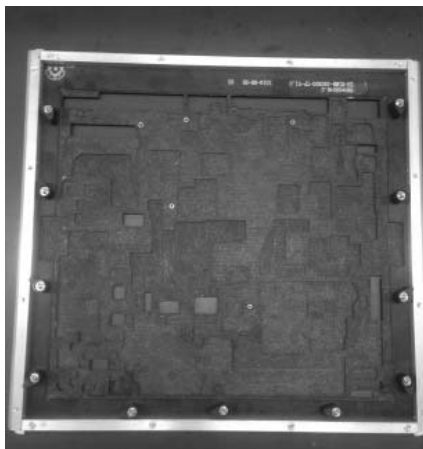


图 6.3 合成石材料掩膜板

3. 钛合金板特性

其优点是具有良好的强度和耐腐蚀性；具有优良的耐热性，最高能耐 550℃ 左右的高温。其缺点是价格昂贵。钛合金材料掩膜板如图 6.4 所示。

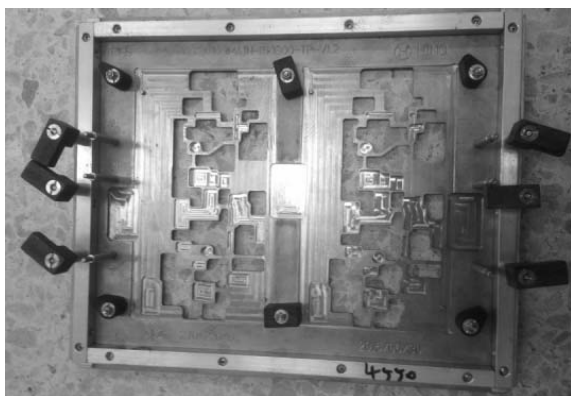


图 6.4 钛合金材料掩膜板

6.1.3 掩膜板设计技术要求

在掩膜波峰焊接中，为了保证产品的焊接质量，掩膜板的设计有如下设计要求。

- ① 应根据对应产品的需求选择合适的掩膜板材料。掩膜板的总体高度一般为 6~8mm，为保证一定的掩膜板强度，其最薄处应不小于 1mm。
- ② 掩膜板上应设计压扣及螺柱，保证 PCB 与掩膜板之间紧密贴合，以防止生产过程中的波峰钎料从 PCB 与掩膜板间的缝隙流到 PCB 上的掩膜板遮蔽处从而损坏 PCB。
- ③ 掩膜板外形一般为矩形，四角应用倒角设计，以利于生产时各传输段之间的顺利传送，从而防止卡板、撞板的发生。
- ④ 掩膜板开口的设计因遵循一定的开口规范，确保被焊引脚与开口边缘间留有足够的距离，以保证被焊引脚焊盘能获得足够的热量，防止冷焊、漏焊、桥连等缺陷的产生，保证焊接质量。

6.2 选择性波峰焊接技术

6.2.1 选择性波峰焊接技术特点

选择性波峰焊接是针对 PCB 上部分通孔元器件而采取的一种机械自动化形式的波峰焊接技术，如图 6.5 所示。选择性波峰焊接设备一般由助焊剂喷涂、预热和焊接三个模块构成。通过设备编程装置，助焊剂喷涂模块可对每个焊点依次完成助焊剂选择性喷涂，经预热模块预热后，再由焊接模块对每个焊点逐点完成焊接。

与传统的波峰焊接相比，选择性波峰焊接技术主要具有如下技术特点。

- ① 在波峰焊接过程中，PCB 的下部需要完全进入液态的钎料波峰中；而在选择性波峰焊接过程中，由于液态钎料喷嘴的直径仅有几个毫米，故仅有被焊点周围的小区域会与液态钎料波峰接触，从而不会使得 PCB 其余的元器件处于液态钎料波峰的高温中。



② 与波峰焊接过程相比较,选择性波峰焊接的助焊剂同样仅涂覆在待焊接部位,大大减少了助焊剂的使用量,同时减少了可能产生的 PCB 板面的助焊剂污染。

③ 选择性波峰焊接技术能够根据每个待焊接部位的热量需求、布局设计、元器件特性等差异设计不同的焊接参数,从而得到良好的焊接效果。



图 6.5 选择性波峰焊接技术

6.2.2 选择性波峰焊接技术工艺流程

典型的选择性波峰焊接的工艺流程包括:助焊剂喷涂、PCB 预热、焊接(包括点焊和拖焊)。

1. 助焊剂喷涂

由 X/Y/Z 三轴移动的机械系统移动助焊剂喷嘴至待焊接部位下方完成喷涂过程。助焊剂喷涂一般具有单嘴喷雾式、微孔喷射式、超声波喷射式等多种方式。为防止助焊剂污染 PCB 表面,其喷涂量及喷涂范围需非常精确,使得助焊剂能准确喷涂在待焊接部位。3 种选择性波峰焊助焊剂喷涂方式如图 6.6 所示。

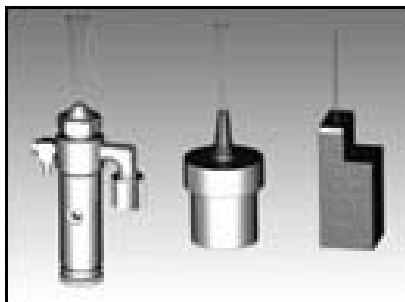


图 6.6 3 种选择性波峰焊助焊剂喷涂方式

2. PCB 预热

在选择性波峰焊接过程中,由于只有待焊点周围的小区域会与液态钎料波峰进行高温接触,因此其预热的主要目的并不是减少 PCB 的热应力,而是为了使助焊剂活化,去除焊盘



表面的氧化物并改善润湿效果,同时为 PCB 在焊接前均匀提供一定的热量,以使一些热容量大的待焊元器件在焊接时得到更好的通孔钎料填充效果。选择性波峰焊接预热系统如图 6.7 所示。

3. 焊接

选择性波峰焊接包括点焊和拖焊两种形式。拖焊适用于单排或多排间距引脚元器件的焊接,点焊则适用于单个或相邻几个引脚的焊接。通过在设备上编程,使钎料波峰喷嘴以不同的速度及角度移动接触待焊接部位,同时设置每个待焊接部位的焊接时间,可获得最佳的焊接质量。由于在选择性波峰焊接过程中,待焊接部位与钎料波峰的接触区域很小,因此其锡炉的设置温度一般比传统的波峰焊接锡炉温度要高,以 Sn63Pb37 钎料为例,选择性波峰焊接的锡炉设置温度一般为 $265\sim 275^{\circ}\text{C}$ 。同时,在焊接区域有供氮装置,以防止焊锡波氧化,提高焊接质量。选择性波峰焊接过程如图 6.8 所示。

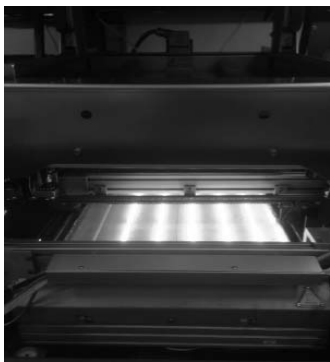


图 6.7 选择性波峰焊接预热系统



图 6.8 选择性波峰焊接过程

6.2.3 选择性波峰焊接设备技术要求

选择性波峰焊接设备的技术要求一般有如下几点:

- ① 适用于有铅、无铅焊接;
- ② 可实现点焊及拖焊工艺;
- ③ 多喷嘴通用性快速更换;
- ④ 配备钎料的快速填充系统;
- ⑤ 多种助焊剂喷涂方式,如滴喷或雾化喷涂;
- ⑥ 在线编程软件功能;红外线点配合编程器进行教学式编程,操作简单易学;
- ⑦ 可设置焊接角度,减少引脚区域锡桥的产生;
- ⑧ 独特的锡波喷嘴设计,喷嘴尺寸从直径 1mm 到 12mm 可选择,且更换方便;
- ⑨ 在线氮气加热系统,氮气温度可在 $25\sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间设定,有效减少氧化及避免喷嘴堵塞;
- ⑩ 具有锡泵转速侦测功能,以防转速不稳引起的波峰跳动;
- ⑪ 助焊剂液位高度检测功能。



6.3 其他局部焊接技术简介

6.3.1 激光焊接技术简介

激光焊接技术是利用大功率相干单色光子流聚焦而成的激光束为能源,借由平面光学元件导引,随后再以反射聚焦元件将光束投射在预直钎料的待焊接部位进行加热并完成焊接的,如图 6.9 所示。

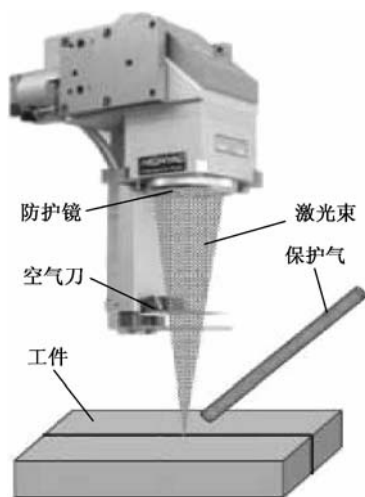


图 6.9 激光焊接技术

激光焊接技术与其他局部焊接方式相比,有如下特点。

- ① 激光焊接为非接触式局部加热,元器件不容易产生热损伤,尤其适用于一些热敏元器件,如 TMOV 器件的焊接。
- ② 焊接过程中的焊接工具污染小,且激光照射时间和输出功率易于控制,从而可获得良好的焊接效果。
- ③ 可在常规方式不易施焊的部位进行焊接,灵活性好。
- ④ 焊接过程自动化,一致性好。

6.3.2 热压焊接技术简介

热压焊接技术是将单相工频交流电经整流滤波获得平稳的直流输出焊接电流,利用电流流过钛等特殊高电阻材料时产生的焦耳热去加热并加压力在预置钎料的待焊接部位以实现焊接的方式。热压焊接设备如图 6.10 所示。

热压焊接技术一般具有如下特点。

- ① 温度调节比较容易,能在较适宜的压头温度实现焊接,保证焊接质量。
- ② 焊接过程所花时间最短,焊接操作过程简单快捷。



- ③ 在电子装联中，热压焊接一般用于连接柔性电路板和刚性电路板。

6.3.3 电磁感应焊接技术简介

电磁感应焊接是利用电磁感应原理将电能转换为热能作用在待焊接部位上进行焊接的局部焊接技术。在电磁感应焊接设备（如图 6.11 所示）中，电感器、阀芯与高频发生器连接，通过电磁加热控制器将工频交流电转换为高频交流电，再由电磁加热线圈把交变的电场转换成交变的磁场，加热筒体在交变磁场的作用下产生涡流从而发热。



图 6.10 热压焊接设备



图 6.11 电磁感应焊接设备

电磁感应焊接技术一般具有如下特点。

- ① 非接触式局部加热，对元器件的热损伤少，适用于热敏元器件的焊接。
- ② 可选钎料焊接，钎料供给自动化。
- ③ 可调整参数有预热时间、送锡时间、加热时间、送锡速度、焊点数量等，可根据每个待焊接部位的热量需求设计不同的焊接参数。






思 考 题

1. 掩膜波峰焊接技术中，掩膜板的材料主要有哪几种？各有什么优缺点？
2. 简述掩膜波峰焊接技术中掩膜板设计的技术要求。
3. 选择性波峰焊接技术的特点有哪些？其助焊剂喷涂一般有哪几种方式？

第7章 手工焊接技术



本章要点

-  手工焊接工艺特点
-  手工焊接物理化学过程
-  手工焊接工具
-  手工焊接工艺操作规范
-  手工焊接工艺质量控制



再流焊接、波峰焊接已无可置疑地成为现代电子组装中举足轻重的工艺方法和手段，它们不仅焊接效率极高，而且焊接质量好、工艺参数可控且稳定、重现性好。然而，现状也表明，尽管手工焊接是一种原始的落后工艺，但是还不能完全淘汰它。手工焊接工艺控制水平仍然会对制造成本、质量和产能产生很大的影响，对无铅化产品尤其如此。因此，继续展开对无铅手工焊接工艺的深入研究是必要的。

7.1 手工焊接工艺特点

焊接是电子装联工艺中不可缺少的关键环节，焊接的目的无外乎以下两个方面，即良好的电气导通和持久的机械连接。

如本书第 2 章所述，焊接并不是通过熔化的钎料将元器件的引脚与焊盘进行简单的黏合，而是钎料中的 Sn 与焊盘金属（一般为 Cu）产生了化学反应，生成新的金属间化合物。图 7.1 为放大 1000 倍的手工焊接焊点剖面，可以清楚地看到在焊盘与钎料之间确实形成了新的物质，主要为 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 。要实现理想的焊接，得到可靠的焊接结果，焊接过程必须在特定的工艺控制条件下完成。在再流焊接和波峰焊接中，工艺参数的控制和温度曲线的要求非常严格，然而在手工焊接中，这些往往被忽视。

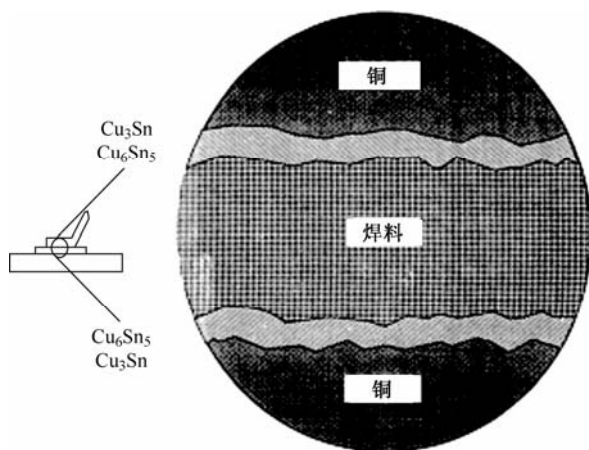


图 7.1 手工焊接焊点剖面

经过多年的实践，人们总结出理想的手工焊接工艺（以有铅钎料为例）需满足两个条件：控制焊接温度为 220°C ，焊接时间为 2s；在各方面条件允许的情况下，尽可能缩短升温时间。图 7.2 为理想的手工焊接温度曲线。

手工烙铁焊的正确顺序应该是烙铁头首先接触焊盘，将热量传递到焊盘从而使焊盘温度升高，然后再将焊锡丝放到焊盘上，此时焊盘的温度应该足以熔化钎料从而形成连接，如图 7.3 所示。这种模式下的热传导效率较低，为了提高焊接速度并保证短时间内的焊接质量，一般而言，手工焊时的烙铁头温度要比钎料熔点高 150°C 左右，如表 7.1 所示。但实际操作时，由于焊接元器件大小及作业目的不同，需要的热量也不同，电烙铁的控温温度就会发生一定变化。以有铅为例，表 7.2 列出了常用元器件焊接烙铁控温温度及焊接时间。特别要注



意的是，不能将焊锡丝直接接触烙铁头，因为烙铁头温度很高，这样操作很容易造成飞溅，严重时可能烫伤工人。

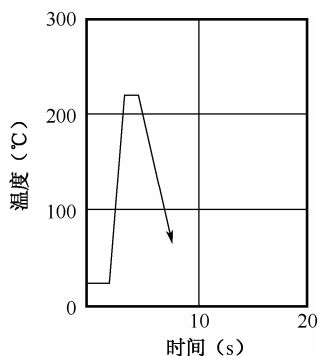


图 7.2 理想的手工焊接温度曲线

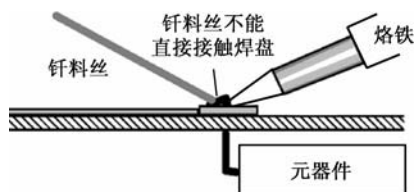


图 7.3 手工烙铁焊示意图

表 7.1 不同焊料理想的焊接温度

焊料	熔点	焊接温度	烙铁头实际温度
Sn63Pb37	183℃	233℃	333℃
SnAgCu	217℃	267℃	367℃
Sn0.7Cu	227℃	277℃	377℃

表 7.2 常用元器件焊接烙铁控温温度及焊接时间

焊接元器件	控温温度	焊接时间
电容电阻	250~270℃	2~3s
新件补焊	280±10℃	2~3s
IC、贴片座	280~300℃	2~3s
拆换零件	300±25℃	2~3s
拉焊	300~330℃	2~3s
特殊零件	330~360℃	2~3s

7.2 手工焊接物理化学过程

手工焊接过程中所发生的物理化学过程如图 7.4 所示，图中所示的过程说明如下。

① 焊接前室温温度为 25~30℃。这时的引脚、钎料和焊盘均为固态状态，它们之间没有连接。

② 当温度接近或达到钎料熔点温度 183℃时，引脚、钎料和焊盘之间由于熔化钎料的表面张力粘接在一起。

③ 当达到化学扩散反应的温度 210~220℃时，化学反应使引脚、钎料和焊盘之间形成了新的金属间化合物，进而实现了持久的焊接，此时金属间化合物的生长速度很快，在最初的一秒内可生成的金属间化合物大约为 0.5μm。

④ 当温度达到 280~350℃或更高时，形成的中间金属间化合物太厚，会使机械强度下降。

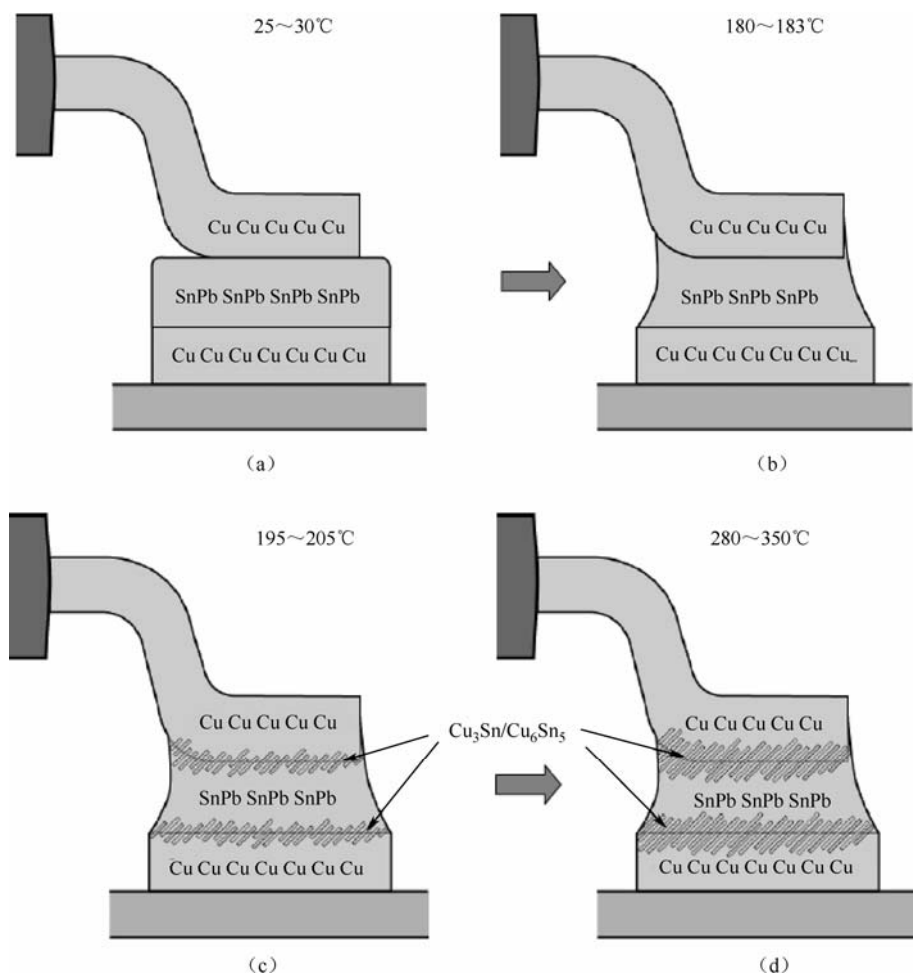


图 7.4 手工焊接的物理化学过程

在手工焊接过程中，形成的金属间化合物厚度与焊点机械强度的关系如图 7.5 所示。从图中可明显看出，随着金属间化合物厚度的增加，机械强度明显下降。而金属间化合物的厚度与焊接温度及时间有关，因此要实现理想的焊接，严格控制焊接温度是非常重要的。焊接温度过低会造成冷焊；焊接温度过高，则会导致焊点的机械强度下降、可靠性降低。

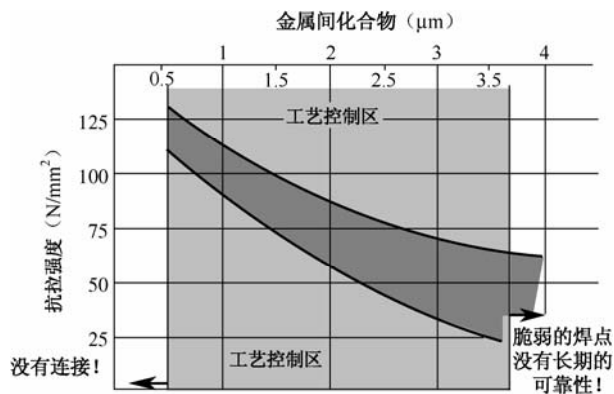


图 7.5 金属间化合物厚度对抗拉强度的影响



7.3 手工焊接工具

软钎焊是电子装联的核心工作,焊点质量除受钎料、助焊剂及其他因素影响外,手工软钎焊的质量在很大程度上取决于所使用的电烙铁。因此,即使在技术已相当进步的今天,研究出高效率和极短时间内使接触温度提升到合适水平的电烙铁,仍然是一件相当有意义的事情。

电烙铁作为一种软钎焊工具,具有悠久的历史。随着电子产品的不断发展,电子行业中应用的电烙铁也在向着小型化、恒定温度和温度可控及减少漏电等方面发展。目前,国内外有许多有关电烙铁的专利,大都着眼于上述要求及延长烙铁头寿命的问题。

7.3.1 电烙铁概述

1. 电烙铁分类

首先,烙铁头焊接传热时为物理接触,会占用一定的物理空间,这对焊接产品布局有一定的要求和局限性。其次,实际生产时,当焊接元器件发生变化时,就要更换相应的烙铁头。再者,烙铁头的维护直接影响电烙铁的使用寿命、软钎焊的效率和质量。

电烙铁一般分为普通电烙铁(外热式和内热式)、恒温电烙铁、变温电烙铁和热风焊电烙铁,如图7.6所示。普通电烙铁应用比较普遍,内/外热式电烙铁结构如图7.7所示。内热式电烙铁的加热元件在烙铁头内部,加热快、热效率高(85%~95%)、体积小、质量轻、耗电省、使用灵活,多采用握笔法,但烙铁头温度高易致氧化变黑,烙铁芯易断,功率较小,主要面向电子类作业,适合焊接小型的元器件。外热式电烙铁既适合焊接大型元器件及



图 7.6 电烙铁分类



大面积的金属结构,也适合焊接小型元器件。由于发热电阻丝在烙铁头的外面,有大部分热散发到外部空间,所以其加热效率低、速度慢,一般要预热 6~7min;其体积较大,多采用握拳法,不便焊接小型元器件,且容易漏电,但比较耐用,功率可做到几百瓦。

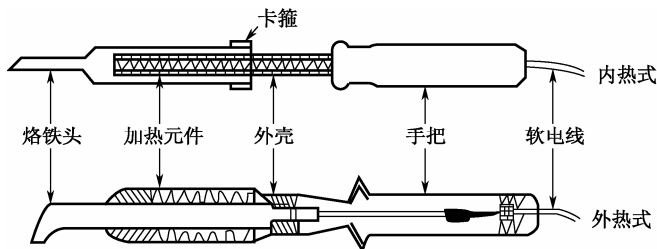


图 7.7 内/外热式电烙铁结构图

2. 烙铁头结构

烙铁头的作用是将电能转换为热能并传递给焊区。烙铁头的材料一般为纯铜或无氧铜。为减少铜在液态钎料中溶解所造成的“咬牙”、“缺口”等问题,如图 7.8 所示,可在铜质烙铁头上镀铁或镍,如图 7.9 所示。电解铜镀金对烙铁头尖部寿命的影响很大,高温操作、宽温度范围操作及长期插电时易导致镀金层疲劳而脱落,影响寿命。铁镀金影响上锡性,温度高或长期使用铁被氧化后与锡的润湿性变差。镉+ α 镀金影响锡爬升,由于高温作用(300℃开始氧化且 450℃急速氧化)引起的脱落、反复清洗引起的金属疲劳而导致脱落,以及高活性助焊剂诱发的腐蚀脱落都会使锡向烙铁头上部移动,进而影响焊锡作业。

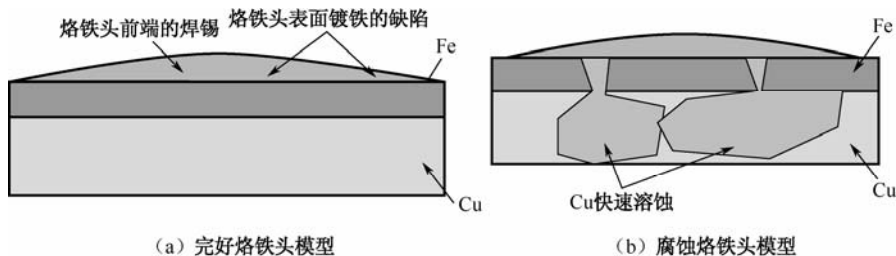


图 7.8 烙铁头腐蚀模型

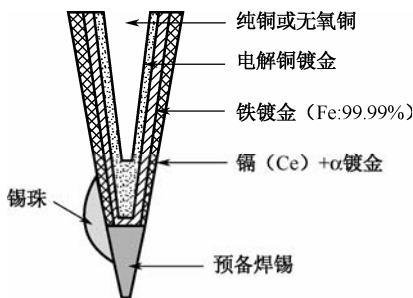


图 7.9 烙铁头结构

烙铁头的形状可根据需要制成尖、扁、圆、平等多种形式,如图 7.10 所示为部分笔式烙铁头形状,主要有锥形、凿形、半圆沟形和圆斜面形等。烙铁头形状的选择要根据焊接的



对象和产品密度而定，错误的烙铁头尺寸、形状、长度会影响热容量及焊接面积。

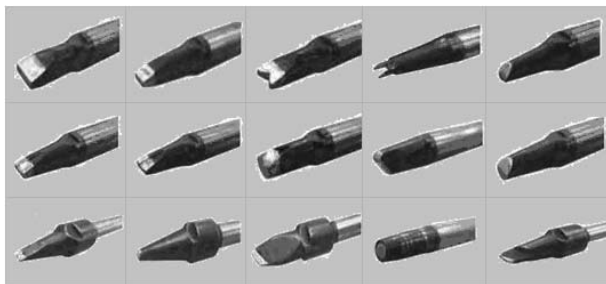


图 7.10 部分笔式烙铁头形状

烙铁头的控温可以采用多种温度控制电路，也可以采用铁镍合金，利用其居里点变化作为恒温点处的启动开关。此外，也有采用 PTC 陶瓷（正温度电阻系数陶瓷）来实现控制的。传统电烙铁由用于储能的烙铁头和加热器构成（如图 7.11 所示），如果需要使温度恒定，则可用热电偶检测烙铁头温度，并通过“人工”反馈对温度进行调节。电烙铁将储存的能量送到焊区，以使钎料、助焊剂熔化并对被焊区进行加温，加热器与被焊区是完全隔离的。换句话说，加热器与被焊区的温度无关，而仅对储存能量部分进行加热，因此烙铁头越大，加热器所需的额定功率也越大，当然，焊区所需温度越高或热耗散能力越大，所需的储存能量也越大。因此，传统的电烙铁是按照不同的瓦数（如 25W、50W、100W），而不是按烙铁头的温度来划分的。储存能量与烙铁头的材料、体积及时间等因素有关，为了得到更高的烙铁头温度就需要更多地储存能量，从而应选择热容量较高的材料，大功率的加热器。表 7.3 为传统内热式电烙铁的功率与工作温度对应表。正因为如此，传统烙铁头存在一些不足，如要求被焊负载基本相似、焊接速度慢、操作者必须技术熟练且经验丰富、PCB 和元器件对温度变化不敏感等。

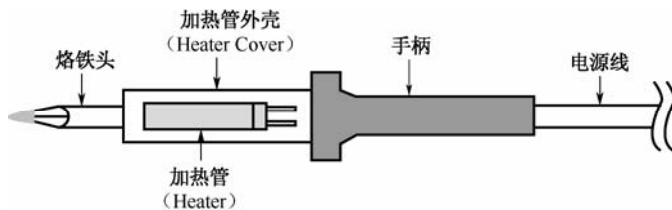


图 7.11 常用内热式电烙铁内部结构

表 7.3 常用内热式电烙铁的功率与工作温度对应表

电烙铁功率	烙铁头工作温度
20W	350℃
25W	400℃
45W	420℃
75W	440℃
100W	455℃



7.3.2 智能电烙铁的工作原理

形成可靠焊点的关键因素是烙铁头与被焊区的接触温度，这个温度应保证钎料熔化并将被焊工件加温，使钎料在被焊区间形成熔融合金层，从而将它们牢固地连接在一起。由于焊点负载的大小不同（如元器件大小、引线粗细、地线长短、接地面大小和散热面大小等），为达到恰当温度所需的热量也不相同。一般来说，操作者并不知道烙铁头有多高的热量，更不会知道每个焊点需要多少热量。因此，接触温度是否能恰当地形成牢固焊点，就只能依靠操作者的经验，这是传统电烙铁技术上的限制。

近年来，由METCAL所研制的Smartheat（智能加热）系统正好克服了上述缺点。METCAL烙铁头可以感知负载变化，并能瞬时调节功率，将合适的热量精确地传到所需的软钎焊处，同时具有自动瞬时关断功能，以保证温度不会超调，这些优点是传统的电烙铁所不具备的。

智能加热采用的是感应加热法。感应加热系统一般由交变电源、感应线圈和被加热件组成，当交流电加于线圈时，会产生一个交流的磁场，在磁性材料上产生涡流并释放焦耳热。涡流的大小从导电材料的外表沿径向中心呈指数下降，即产生“磁屏蔽”，又称为“趋肤”效应，其深度随频率和相对磁导率的减小而减小，但随电阻率的提高而增大。智能电烙铁采用的发热体与普通发热体的不同点就在于其本身具有检测和保持预定温度的能力。智能电烙铁头（即发热体）的外层是铁磁合金，而中心则是导热和导电极好的铜材料制成的复合体。当采用较高频率的交流时，大部分电流都通过发热体表面，造成迅速发热。图 7.12 为智能电烙铁的工作过程，其焊接时的温度过程如图 7.13 所示。

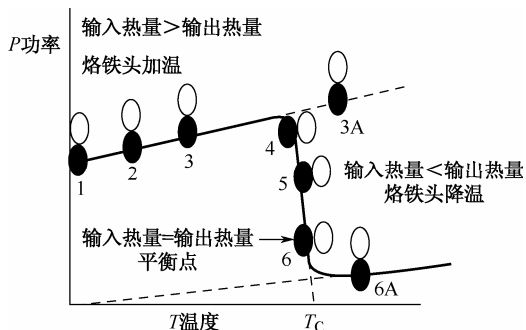


图 7.12 智能电烙铁的工作过程

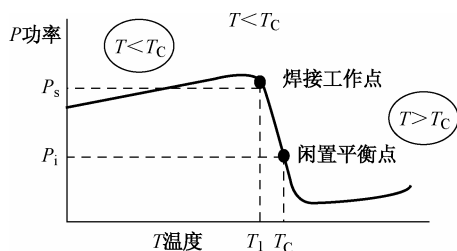


图 7.13 智能电烙铁运行时温度与功率的关系

智能电烙铁加热器的功率，除有一定不可避免的损失外，均直接转为被焊区所需的能量，而无需通过存储再传递到焊点或焊缝上。为使能量得到充分利用，应减小电烙铁的热容量，消除不必要的传热界面。智能电烙铁达到软钎焊负载所需的温度速度快、工作原理及性能符合 ISO9000 要求、校准周期短（如图 7.14 所示）、维护方便。

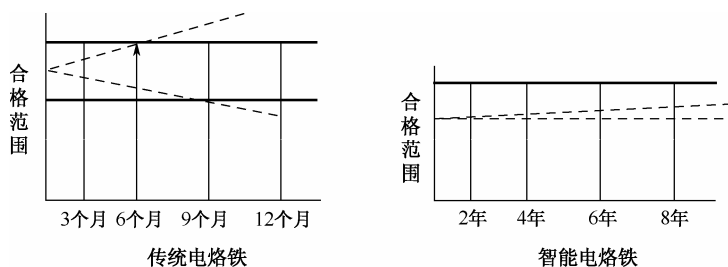


图 7.14 传统电烙铁与智能电烙铁的温度需校准时间

7.3.3 无铅化对电烙铁性能的影响

烙铁头消耗的过程，实际上是对烙铁头寿命起决定作用的镀铁层从开始形成锡的反应层，反应层逐渐变厚直至崩溃消失的过程。如图 7.8 所示，Sn 通过表面缺陷扩散到早期的 FeSn_2 中与 Fe 接触而反应，经过的时间越长， FeSn_2 层就越厚，直至 Fe 完全被锡侵蚀而出现穿孔的现象。

烙铁头是手工烙铁焊中主要的消耗品，其在使用过程中失效、寿命降低的原因主要包括焊锡的高熔点、高含锡量、高温氧化及更高活性的助焊剂等。无铅化后高锡含量无铅钎料在高温下增加了对烙铁头的腐蚀， $500\mu\text{m}$ 镀铁层电烙铁使用无铅焊丝的寿命约为使用 SnPb 锡丝时的寿命的 $1/3$ 。在实际操作过程中，应尽量避免在过高温度下操作，因为高温下烙铁头的氧化速度会增加很多。另外，用完后待烙铁头温度稍微降低一些时应涂一层钎料以防止烙铁头氧化。

无铅手工焊用电烙铁多为新型恒温电烙铁，具有高效率的新型加热器和热检测的烙铁头构造，如图 7.15 所示，使其具有非常好的回温性；具有高品质烙铁头，能有效防止拉尖现象；具有氮气保护和自动待机温度安全管理等功能，即不作业时烙铁头温度自动下降。图 7.16 为具有氮气保护功能的电烙铁，可对烙铁头及焊点进行保护，防止氧化。

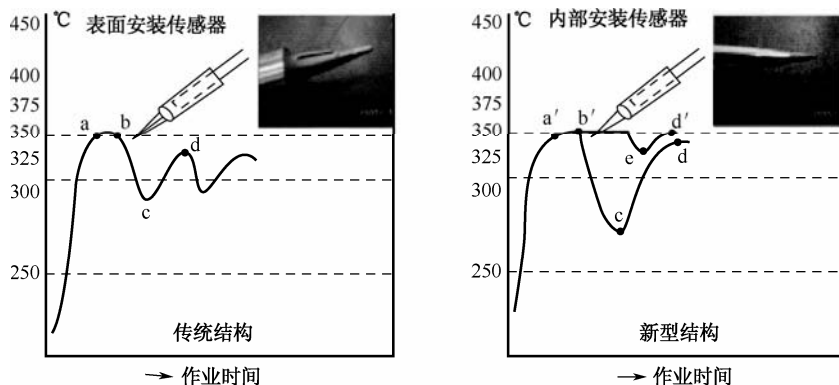


图 7.15 新型电烙铁的热传感结构

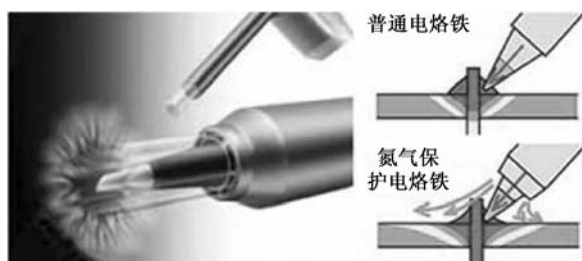


图 7.16 具有氮气保护功能的电烙铁

7.3.4 电烙铁的维护保养

① 不要使用太高温进行焊接。高温会使烙铁头加速氧化，从而降低烙铁头的寿命。例如，烙铁头的温度超过 470°C 时的氧化速度是 380°C 的两倍。

② 不要长期在高电压条件下使用电烙铁。高电压将导致烙铁头过热，同时也会缩短发热芯的寿命。

③ 应使用浸湿后又挤干的海绵清洁烙铁头。用干燥的海绵清洁烙铁头容易使烙铁头表面的镀锡层剥落而导致烙铁头不上锡，因此海绵必须先浸湿再挤干，方可使用。

④ 焊接过程中不要施加过大的压力。焊接过程中需采用接触方式，如果过分施压或摩擦会使烙铁头变形，严重降低烙铁头的耐用程度。

⑤ 尽可能选用线径较大的焊锡丝，可有效防止烙铁头氧化。一般而言，应尽可能选用线径在 0.8mm 以上的锡线。

⑥ 经常在烙铁头表面涂上一层焊锡，可减小烙铁头的氧化概率，使烙铁头更耐用。一般在使用后，待烙铁头温度稍微降低后涂上新的焊锡层，可使镀锡层达到最佳的防氧化效果。

⑦ 使用后，电烙铁需摆放在支架上，以免烙铁头受到碰撞而损坏。

⑧ 应及时清理烙铁头表面的黑色氧化物或锈斑，否则会导致不易上锡。清理时最好把烙铁头温度调整至 250°C 左右，再用清洁海绵清洁烙铁头，然后在镀锡层上加焊锡。不断重复这一动作，直到将烙铁头上的氧化物清洁干净为止。

⑨ 选择正确的烙铁头尺寸和形状，使工作更有效率及增加烙铁头的耐用程度。

7.4 手工焊接工艺操作规范

7.4.1 手工焊接工艺过程

手工软钎焊接工艺分为三步法和五步法，如图 7.17 所示，主要包括焊前准备、加热焊件、熔化焊丝、移开焊丝、移开电烙铁。

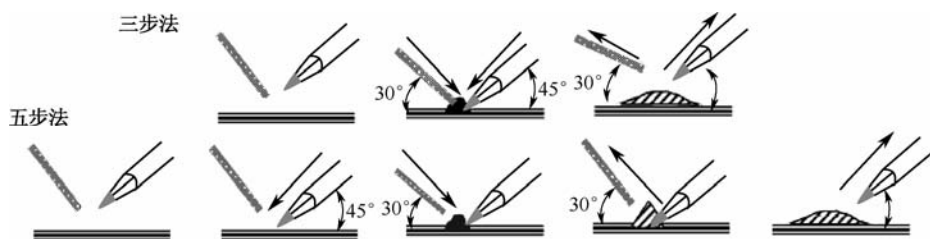


图 7.17 手工软钎焊工艺步骤

焊接时先用电烙铁同时加热被焊件（焊盘和元件），加热 1~2s 后送入焊丝，与电烙铁及焊件形成热桥，保证能有效传递热量。图 7.18 为手工电烙铁焊接送丝工序的常见方式，不要把焊锡丝送到烙铁头上，也不能用电烙铁头来回在焊盘上划动。传递到焊件上的热量不仅取决于温度，还取决于烙铁头与焊件的接触面积。烙铁头的接触方法应有利于热传导，可将烙铁头置于焊盘与引脚交界处接触面积最大的地方。有时焊前需给烙铁头上锡，这是为了增加热传导面积，提高热效率。焊锡量要适中，用量过多会形成焊点锡堆积，焊锡量少则不足以包裹焊点。

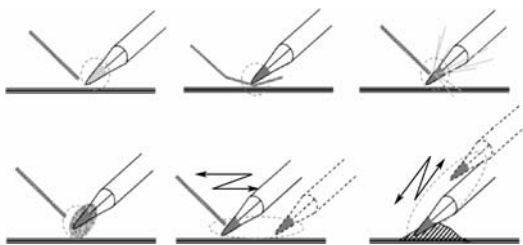


图 7.18 手工电烙铁焊接送丝工序的常见方式

当焊锡熔化后形成焊点，即刻向上 45° 移开焊丝，继而向上 45° 移开电烙铁。烙铁头撤离时轻轻旋转一下，可保持焊点适当的焊料量。冷却时应注意在焊锡未完全凝固前不要晃动元件和 PCB，以免造成虚焊。如果在规定的时间内不能完成焊接，必须冷却后复焊，但是次数应不大于 2 次，在同一个焊点上重复焊接，高温下时间过长助焊剂会失效、碳化，并会使金属间化合物的厚度增加，削弱焊点强度。

值得注意的是，过大的压力对热传导没有任何帮助，只会造成烙铁头氧化，产生凹痕，使焊盘翘起；过高的温度和过长时间，会使助焊剂失效而增加金属间化合物的厚度。

7.4.2 手工焊接工艺操作要领

新电烙铁在使用前，应先用锉刀把烙铁头按需要挫成一定的形状，然后接上电源，当烙铁头温度升到熔锡时，将烙铁头在松香上沾涂一下，等冒烟后沾涂一层焊锡，如此反复 2~3 次，使烙铁头的刃面全部挂上一层锡。若电烙铁无数字显示温度，操作人员则可以根据烙铁头的发烟量来判断温度。如图 7.19 所示，当用焊丝接触烙铁头时，助焊剂开始受热挥发，观察其发烟量，如果发烟量少，则表示温度不够；如果发烟量大，则表示温度过高；如果发烟量中等并持续 6~8s，则烙铁头温度为 300℃ 左右，可以用来焊接了。

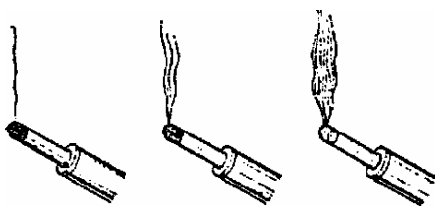


图 7.19 不同温度下烙铁头的发烟量

电烙铁的握法分为反握法、正握法和握笔法,如图 7.20 所示。为了人体安全,一般电烙铁离开鼻子的距离为 30cm。反握法动作稳定,长时间操作不易疲劳,适合大功率电烙铁操作;正握法适合中等功率电烙铁或带弯头电烙铁操作;一般在工作台上焊 PCB 时多采用握笔法。焊接时一般左手拿焊丝,右手拿电烙铁。焊丝常见拿持法如图 7.21 所示,拖焊丝采用左图方式,点焊采用右图方式。

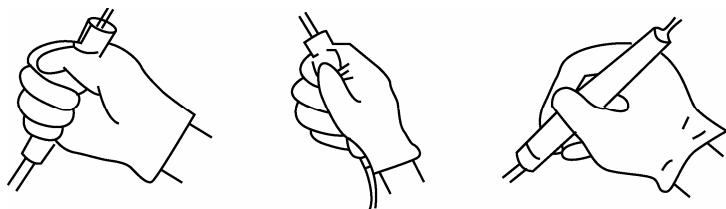


图 7.20 电烙铁常见握法

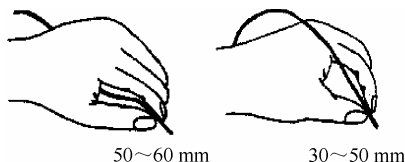


图 7.21 焊丝常见拿持法

在焊接过程中,烙铁头前端因助焊剂污染,易产生焦黑残渣,妨碍烙铁头前端的热传导,必须用湿布或湿海绵进行清洗保持清洁,最好焊接每个焊点之前都对烙铁头进行清洁。用湿海绵清洁时,应严格参考图 7.22 执行,不可任意敲击烙铁头以免损坏。内热式电烙铁连接杆钢管壁厚度只有 0.2mm,不能用钳子夹以免损坏。

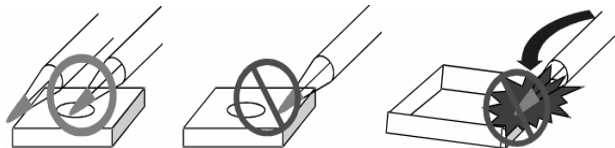


图 7.22 用湿海绵清洗烙铁头的方式

用湿海绵清洗烙铁头时,如果用水过量,烙铁温度会急速下降(如图 7.23 所示),锡渣就不容易落掉;水量不足时,海绵会被烧掉,诱发焊锡不良;水量合适时,烙铁头接触的瞬时,水会沸腾波动,达到清洗的目的。用海绵清洗时,将其泡在水里,取出后轻轻挤压海绵,可挤出 3~4 滴水珠为宜,如图 7.24 所示。一般 2 小时清洗一次,有时也可每天早上用清洁剂将海绵清洗干净。粘在海绵上的焊锡附着在烙铁头上,会导致助焊剂不足,同时海绵上的残渣也会造成二次污染烙铁头。

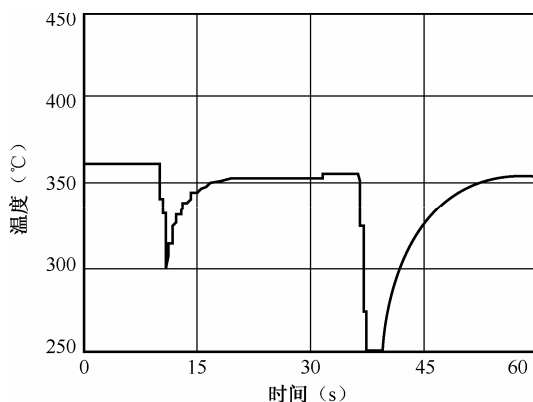


图 7.23 海绵过量水分会导致烙铁头温度恢复较慢

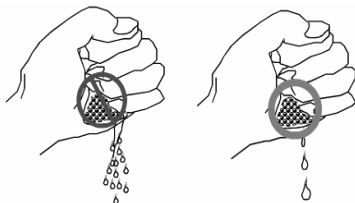


图 7.24 湿海绵含水量

电烙铁不宜长时间通电而不用，容易使烙铁芯加速氧化而烧断，缩短其寿命；同时，还会使烙铁头因长时间加热而氧化甚至被“烧死”。可人为用细纹锉刀进行修复，重新涂上助焊剂和焊锡，形成保护层，如图 7.25 所示，或直接更换烙铁头。

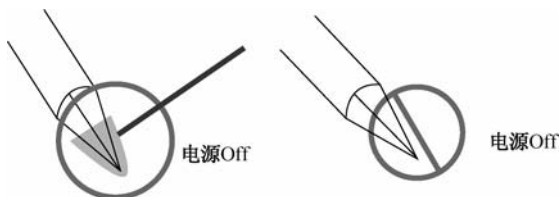


图 7.25 断电时烙铁头的焊锡保护

手工烙铁焊工艺工作现场需配置局部粉尘吸收器（如图 7.26 所示）、个人防护罩及辐射控制系统，并遵守环境保护相关条约，如 ISO14000 等。手工焊接前，要做好现场防静电要求（如图 7.27 所示），防止静电对元器件造成损伤。

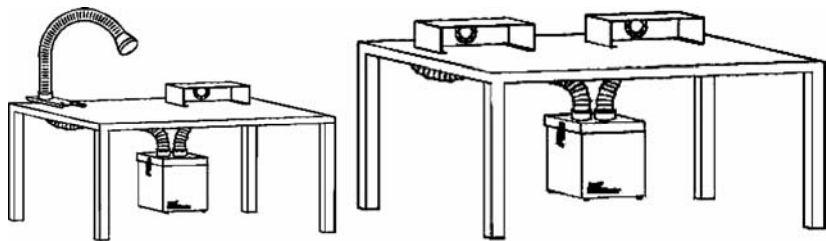


图 7.26 手工烙铁焊工艺工作现场的粉尘吸收器装置

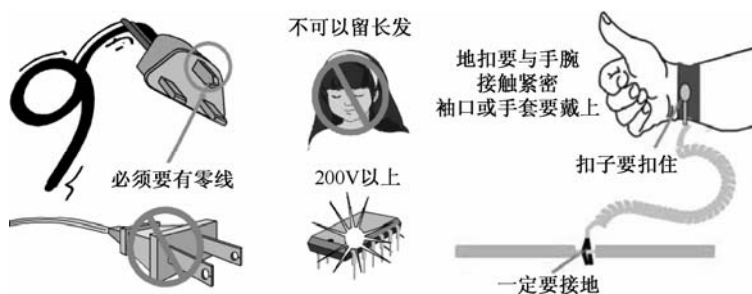


图 7.27 手工烙铁焊工艺工作现场的防静电措施

7.5 手工焊接工艺质量控制

7.5.1 手工焊接工艺参数要求

IPC 和 MIL-STD 规定：焊接温度一般高于焊锡熔点 50°C ，不得高于焊锡熔点的 40% ，停留时间为 $2\sim 5\text{s}$ ，无铅焊接时为 $3\sim 5\text{s}$ 。

QJ3011-98 规定：手工焊接温度一般应设定在 $260\sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内，时间一般不超过 3s ，对热敏元件和片状元件不超过 2s ，若在规定的时间内未完成焊接，应待焊点冷却后再重复焊接，但是不能超过 2 次。

QJ3117-99 规定：对于电子元件的建议焊接温度为 280°C ，任何情况下不得超过 320°C 。

值得注意的是，非恒温烙铁头的实际温度一般比焊接温度要高出 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ （非恒温电烙铁），因为烙铁头焊接时的热量输入会降低其温度，如图 7.28 所示。

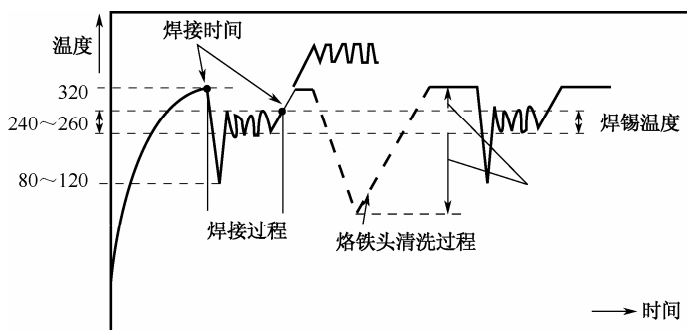


图 7.28 烙铁头温度随焊接及清洗工艺过程的变化曲线

7.5.2 电烙铁的选择与使用

电烙铁是手工软钎焊中的一种主要加热设备，主要关注的是电烙铁质量和操作者技能，尤其依赖于烙铁头的温度和几何形状。电烙铁是把电能转换成热能对焊接部位进行加热的焊接工具，一般来说，其功率越大，热量越大，烙铁头温度也越高。实际使用时电烙铁的功率



过大易烧坏元件,如二极管、三极管的结点温度在 200°C 左右就会损坏,焊接最好在 $1.5\sim 4\text{s}$ 内完成。实际操作过程中,同样的焊点,其焊接时间与烙铁温度、操作者的熟练程度有关,一般 $1\sim 2\text{s}$ 适用于小焊点,如热敏器件、片式元器件等; $2\sim 3\text{s}$ 适用于中焊点,如纸基或玻璃纤维基 PCB、通孔插装元器件、多引脚贴装器件、搪锡及导线等; $3\sim 5\text{s}$ 适用于大焊点,如玻璃纤维基 PCB、焊接面积大或散热快者及屏蔽线或较粗的导线等。表 7.4 为常见焊接对象进行手工烙铁焊时电烙铁的选择与使用要求(以有铅为例)。

表 7.4 电烙铁的选择与使用要求

焊接对象及工作性质	烙铁头温度 (室温、220V 电压)	选用电烙铁
一般印制电路板、安装导线	$300\sim 400^{\circ}\text{C}$	20W 内热式、30W 外热式、恒温式
集成电路	$300\sim 400^{\circ}\text{C}$	20W 内热式、恒温式
焊片、电位器、 $2\sim 8\text{W}$ 电阻、大电解电容器、大功率管	$350\sim 450^{\circ}\text{C}$	35~50W 内热式、恒温式 50~75W 外热式
8W 以上大电阻、 $\phi 2\text{mm}$ 以上导线	$400\sim 550^{\circ}\text{C}$	100W 内热式、150~200W 外热式
汇流排、电阻板等	$500\sim 630^{\circ}\text{C}$	300W 外热式
维修、调试一般电子产品		20W 内热式、恒温式、感应式、两用式

1. 电烙铁选用原则

选择合适的电烙铁将有助于大大提高烙铁头的焊接效率。通常情况下,选择应根据被焊物体的实际情况而定,一般重点考虑加热形式、功率大小、烙铁头形状等。

以下为电烙铁选用的基本原则。

- ① 必须满足焊接所需热量,并能在操作过程中保持一定的温度。
- ② 温升快、热效率高,在连续操作时温度下降不多。
- ③ 电气、机械性能安全可靠。
- ④ 质量轻、操作舒适、工作寿命长、维修方便。
- ⑤ 烙铁头形状要适应焊接空间的要求。

2. 电烙铁功率的选择

QJ3117-99 规定:印制电路板组装件的焊接一般采用 $30\sim 50\text{W}$ 电烙铁,用于微型器件及片状元器件的焊接一般采用 $10\sim 20\text{W}$ 电烙铁,用于对热敏感元件或板块的焊接一般采用 $20\sim 30\text{W}$ 电烙铁,用于印制线路板的无铅焊接装配一般采用 $30\sim 50\text{W}$ 电烙铁,用于较薄的多层板或较大的接线端子和接地线一般采用 $50\sim 70\text{W}$ 电烙铁。

如果要更科学地选择电烙铁,烙铁头的温度恢复时间应与被焊件表面特征属性相适应。温度恢复时间是指在焊接周期内,烙铁头顶端温度因热量散失而降低后再恢复到最高温度所需的时间,它与电烙铁功率、热容量及烙铁头形状、长度有关。一般建议购买可实现恒温 and 调温,功率一般在 $30\sim 50\text{W}$ 的电烙铁,否则当产品上有不同元器件大小及金属结构时,需要根据不同产品更换电烙铁功率。选择时电烙铁功率在可接受的情况下应尽可能大一些,能使焊件及焊锡迅速达到熔化温度,在尽可能短的时间内完成焊接,以防止过多的热量扩散到焊接区外的地方,防止热损伤。



3. 烙铁头的选择

烙铁头大小与其热容量有直接关系，烙铁头越大，热容量也相对越大，反之亦然。进行拖焊时，使用越大的烙铁头，温度跌幅就越小；且大烙铁头的热容量高，焊接时可以使用较低的温度，降低氧化程度。短而粗的烙铁头比长而细的烙铁头传热快，而且比较耐用。扁而钝的烙铁头比尖锐的烙铁头能传递更多的热量。一般来说，烙铁头的尺寸以不影响邻近元器件为标准，选择能够与焊点充分接触的几何尺寸能提高焊接效率。图 7.29 为常见烙铁头形状及应用场合。

以下为烙铁头选用的基本原则：

- ① 采用最大直径的烙铁头；
- ② 选择烙铁头的几何形状使其与焊盘的接触面积最佳，烙铁头直径为焊盘直径的 0.5~1 倍之间为匹配状态；
- ③ 确保有足够的通路使热能量能有效传递给焊盘；
- ④ 采用最短的烙铁头设计，确保热能量的传递路径最短。

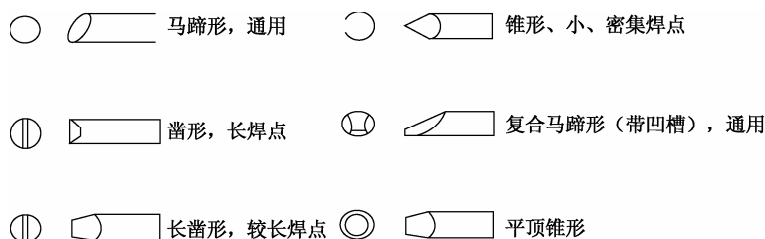


图 7.29 常见烙铁头形状及应用场合

烙铁头热传导率的影响因素主要包括烙铁头与焊盘的接触面积，烙铁头的长度、直径，烙铁头的镀层厚度，烙铁头的质量密度，加热体的功率密度，烙铁头的闲置温度设定等。图 7.30 为不同形状烙铁头及其热传导因子 W/L 的对应关系（ W 为烙铁头直径， L 为烙铁头长度）。由图可见，短而粗的烙铁头的热传导率比较高。



图 7.30 不同形状烙铁头及其热传导因子的对应关系

4. 钎料丝的选择

钎料丝，也称锡丝，主要用于手工焊接工艺中，根据应用场合的不同有一系列的粗细规格，常用的有 0.3mm、0.5mm、0.8mm、1.0mm、1.2mm、1.6mm。为了焊接的需要，钎料丝中也需要有助焊剂成分，且包裹在金属钎料里面（如图 7.31 所示），其含量一般为 0.1%~3.5%（激光焊用除外），推荐 2wt%~3wt%，常见灌注方式有 1 芯、3 芯和 5 芯等，如图 7.32 所示。

钎料丝的成分常见的有 Sn37Pb、Sn40Pb、Sn3.0Ag0.5Cu、Sn1.0Ag0.7Cu、Sn0.3Ag0.7Cu、Sn0.5Ag0.5Cu，一般选择与回流焊或波峰焊相同的合金与助焊剂成分，若被焊件氧化严重，也可适当选择高活性的助焊剂，有助于去除焊件表面的氧化物。但不要使用过多的助焊剂（会引发腐蚀和电迁移），也不要使用过期的钎料丝（钎料丝的使用年限一般为 2 年）。

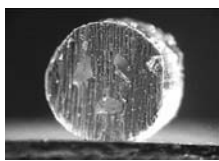


图 7.31 钎料丝剖面图



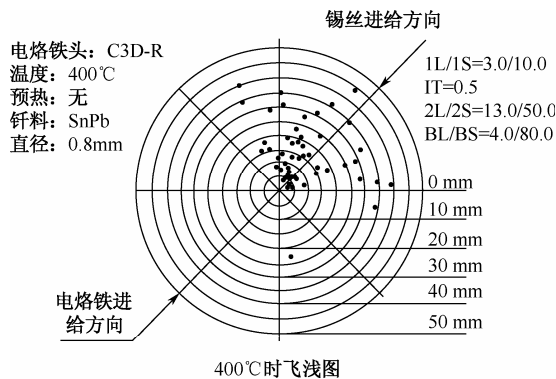
图 7.32 钎料丝横截面示意图

钎料丝的直径常介于 $0.3 \sim 3\text{mm}$ 之间，线径不能太粗，越粗则烙铁头的热量越容易被夺取。一般根据焊点大小选择焊丝的直径，通孔元器件选择焊锡丝的直径略小于焊盘宽度的 $1/2$ 。 $0.8 \sim 1.0\text{mm}$ 线径适用于小焊点，如热敏元器件、片式元器件、多引脚小间距的贴装器件等，表贴元器件一般选择 $\phi 0.5\text{mm}$ 焊丝； $1.0 \sim 1.2\text{mm}$ 线径适用于中焊点，如通孔插装元器件，多引脚中、大间距的贴装器件，搪锡及导线等； $1.0 \sim 2.0\text{mm}$ 适用于大焊点，如搪锡、屏蔽线、较大或散热快的接地、添锡拆焊等。

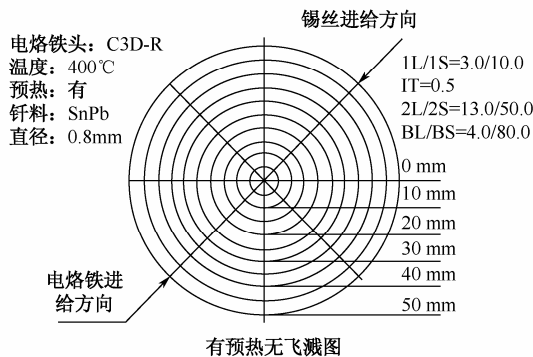
5. 无铅化对烙铁焊选用的影响

无铅化手工烙铁焊的注意事项如下。

- ① 电烙铁的功率一般在 60W 以上， $70\text{W}/75\text{W}$ 最为合适，烙铁头温度为 $370 \sim 400^\circ\text{C}$ 。
- ② 建议使用恒温电烙铁，这样既能够保证足够的焊接温度，又不会因烙铁头过热损伤电烙铁。
- ③ 建议增加预热工序，如图 7.33 所示，以防止烙铁头过热导致严重的飞溅问题。



(a) 焊接温度越高，飞溅越严重



(a) 增加预热，防止飞溅

图 7.33 预热对手工焊接工艺飞溅的影响



④ 无铅钎料的高锡含量对烙铁头的腐蚀相对严重，建议使用质量优良的电烙铁，特别是烙铁头表面应带有有效防护镀层，且严格按照工艺规范操作，否则就会产生如表 7.5 所示的使用问题。

⑤ 用于无铅焊接的电烙铁必须具有很好的回温性能，该性能对 IC 引脚的拖焊尤为重要。

表 7.5 常见电烙铁的使用问题及抑制措施

条件	症状	原因	防止	处理办法
有机残留物	不沾锡、黑色残留物	酸性腐蚀	保持烙铁头裹锡	定时用金属丝去除残留物，重新对烙铁头在锡炉中沾锡
氧化	氧化、铁锈色	空气接触氧化	保持烙铁头裹锡	强力助焊剂，裹锡
Sn-Fe 合金层覆盖	不沾锡，黑色残留物	过度裹锡	不用时，低功率输出	定时用金属丝去除残留物，重新对烙铁头在锡炉中沾锡
Fe 层破裂	Fe 层有洞	操作员用力压迫	保持烙铁头裹锡	损坏
Fe 溶解	Fe 层有洞	酸腐蚀	旋转烙铁头	损坏
Fe-Dissolution (tin) 分解	Fe 层有洞	长期裸露	不用时，低功率输出	损坏

思 考 题

1. 简述手工烙铁焊的工艺特点及其无铅化的影响。
2. 简述电烙铁的基本分类及烙铁头结构。
3. 简述手工烙铁焊的工艺过程。
4. 简述手工烙铁焊的操作要领。
5. 简述手工烙铁焊的质量控制要素。

第 8 章 PCBA可制造性设计（DFM）



本章要点

- 📁 电子产品分类及其质量标准要求
- 📁 可制造性设计（DFM）对电子产品质量的意义
- 📁 可制造性设计（DFM）概述及主要内容
- 📁 PCBA 组装方式设计
- 📁 PCB 可制作性设计
- 📁 PCBA 可组装性设计



8.1 电子产品分类及其质量标准要求

8.1.1 电子产品分类

IPC 根据电子产品的功能、性能及复杂程度将其划分为以下 3 级。

① 1 级，一般电子产品，如消费类电子产品，适用于那些外观缺陷并不重要，主要要求 PCB 功能的产品。

② 2 级，专用服务电子产品，如通信产品等，这些产品要求高性能、长寿命，同时希望不间断工作。

③ 3 级，高可靠性电子产品，如飞行控制系统、生命支持系统，不允许出现停机的产品。同时，根据电子产品的最终使用类型，IPC 又将其划分为以下 9 类。

① 消费类产品，包括游戏机、玩具、音频与视频产品。此类产品要求操作方便，功能齐全，产品成本特别受关注。

② 商用或个人用计算机。此类产品希望有较长的寿命和较持续的服务。

③ 电信产品，包括电话、开关系统、交换机等。此类产品希望有较持续的服务，能耐受条件相对恶劣的工作环境。

④ 商业飞机，要求尺寸小、质量轻和高性能。

⑤ 工业用品及车内饰用品，关注产品的尺寸和功能，在确保预期要求的质量前提下，成本非常重要。

⑥ 高性能产品，包括军用海陆产品、高速高性能计算机、关键过程控制器、医疗系统产品。此类产品首先关注产品性能、品质及可靠性，其次是尺寸和功能。

⑦ 航天太空产品，关注很大范围的空间环境和物理极限上的高品质与性能。

⑧ 军用航空电子产品，用来满足要求非常高的机械与温度变化。其尺寸、质量、性能及可靠性极为重要。

⑨ 汽车引擎用电子产品。这些产品要耐受所有使用环境的最恶劣情况，要面对极端的温度与机械变化；除此以外，还要求达到大规模生产的最低成本和最佳的可制造性。

8.1.2 电子产品质量标准要求

目前国内、外电子产品制造领域普遍采用 ANSI/J-STD-001 和 IPC-A-610 作为电子装联的质量标准。由于焊点的形成直接受焊盘布局及设计的影响，因此执行上述两个标准的前提是：PCBA 的布局和焊盘设计必须遵循下述文件的约束。

- IPC-7351（表面安装元器件和焊盘图形标准通用要求）。
- IPC-SM-782（表面贴装设计与焊盘结构标准）。
- IPC-2221（印制板设计通用标准）。
- IPC-2222（刚性有机印制板设计分标准）。



如果设计没有遵循上述文件的规定, ANSI/J-STD-001 和 IPC-A-610 所定义的焊点形状就不能达到相应的质量要求。

8.2 可制造性设计 (DFM) 对电子产品质量的意义

可制造性设计 (Design for Manufacture, DFM) 具体描述了在进行产品设计过程中必须考虑的可制造的工艺性要求, 研究了产品本身的物理设计与制造系统各部分之间的相互关系, 并把它用于产品设计中以便将整个制造系统融合在一起进行优化。DFM 可以降低产品的开发周期和成本, 使之能更顺利地投入生产。

产品质量是设计和制造出来的, 在生产实践中由于 PCBA 设计不良而导致的焊接缺陷层出不穷, 对这类缺陷仅凭改善操作和革新工艺是难以奏效的, 这就造成了“先天不足, 后天难补”的尴尬局面。设计阶段决定了产品 80% 的制造成本, 良好的 DFM 是降低制造缺陷、简化制造过程、缩短制造周期、降低制造成本、优化质量控制、增强产品市场竞争力、提高产品可靠性和耐用性等的重要途径。

因此, 电子产品的质量控制应开始于 PCBA 的设计阶段, 对 PCBA 的可制造性、可使用性、可检测性、制造的经济性、质量的稳定性等进行充分的论证和关注, 并让开始的设想能贯穿到交货包装前的整个过程。在每个新的 PCBA 设计开始阶段就要建立设计、工艺、生产及质检人员间的互相信任、通力合作的机制, 即执行工艺、生产及质检人员早期介入产品研发的并行技术路线, 这就是解决因设计不良而造成焊接缺陷的唯一正确途径。

8.3 可制造性设计 (DFM) 概述及主要内容

8.3.1 可制造性设计概述

谈到可制造性设计, 很多资料都会讲解光学定位符号设计、传送边设计、组装方式设计、间距设计、焊盘设计等, 这都是一些设计要素, 但核心是要如何将这些要素“协调与统一”起来。图 8.1 给出了 PCBA DFM 的内容及其关联性。在图中, 空心箭头表示设计步骤, 实线箭头表示两设计因素的主从关系或决定关系, 虚线箭头表示 DFM 对质量的影响。

在 PCBA 可制造性设计中, 一般先根据硬件设计材料明细表中的元器件数量与封装确定 PCBA 的组装方式, 它决定了组装时的工艺路径; 然后根据每个装配面采用的焊接工艺方法进行元器件布局; 最后根据封装与工艺方法确定元器件之间的间距、焊盘、钢网厚度与开孔图形设计。

从图 8.1 可以看到几个方面的内容: 封装是可制造性设计的依据和出发点; 焊接方法决定元器件的布局; 封装决定焊盘与钢网开窗的匹配性; 可制造性设计与 SMT 工艺决定制造的良率。这些观点或逻辑关系是可制造性设计内在联系的体现, 在可制造性设计时必须记住这些观点, 以便进行“一体化”设计。

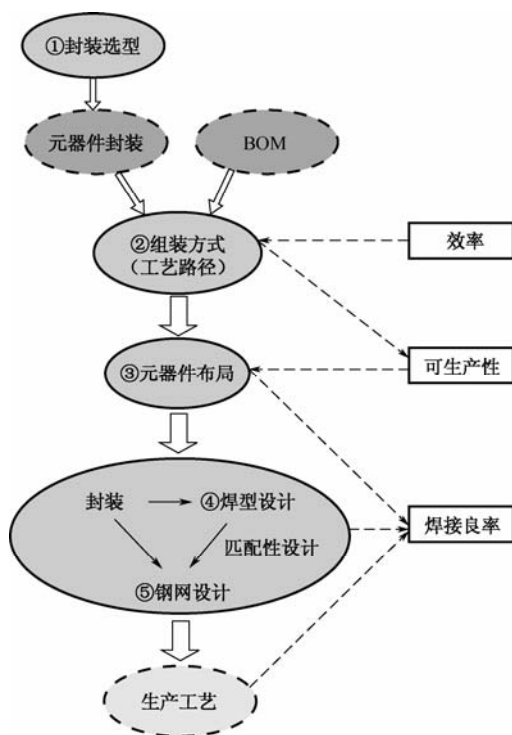


图 8.1 PCBA DFM 的内容及其关联性

8.3.2 可制造性设计内容

PCBA 可制造性设计包括 PCB 的可制造性设计和 PCBA 的可制造性设计两部分内容。

PCB 可制造性设计侧重于“可制作性”，设计内容包括板材选用、厚度选择、叠层结构设计、布线密度、阻焊设计、丝印设计、表面处理、翘曲变形等。PCB 的可制造性设计的重点在于满足 PCB 厂的工艺能力。了解 PCB 的制作方法、工艺流程和工艺能力是实施工艺设计的基础。

PCBA 可制造性设计侧重于“可组装性”，即建立稳定而可靠的工艺性，实现高质量、高效率 and 低成本的焊接。其设计内容包括封装选型、焊盘设计、组装方式设计、元器件布局、钢网设计等。了解各类封装的工艺特点、常见焊接缺陷及其影响因素非常重要。

8.4 PCBA 组装方式设计

8.4.1 电子产品的可生产性等级

IPC 标准 (IPC-SM-782) 提供了 3 个级别的设计复杂性，它们均表现在特性、公差、测量、组装、成品的测试或制造工艺上，集中反映了工具、材料或工艺的复杂性等方面均有不同程度的提高，因此在制造成本上也有相应的提高。



- ① A 级：简单的装配技术，用来描述通孔元器件的安装。
- ② B 级：中等的装配技术，用来描述表面元器件的贴装。
- ③ C 级：复杂的装配技术，用来描述在同一 PCBA 中通孔与表面安装的互相混合。

8.4.2 电子产品的组装方式分类

电子产品组装方式的规定进一步描述了元器件在 PCB 上的布局形式，如在 PCB 上是单面安装、双面安装还是混合安装。

类型 I：定义为只在 PCB 一面安装元器件的方式，又可分为 THT 安装（A 级）、SMT 安装（B 级）及 SMT/THT 混合安装（C 级）等形式，如图 8.2 所示。

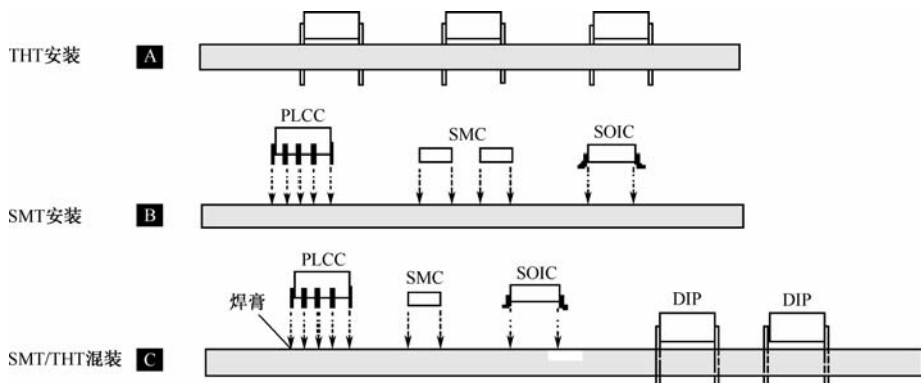


图 8.2 组装类型 I

类型 II：定义为 PCB 两面都有元器件的安装方式，又可分为 SMT 混装 FPT 安装（B 级）、SMT/THT 混装（C 级）、SMT/THT/FPT/CMT 混装 3 种类型，如图 8.3 所示。在类型 II 中只限于 B 级或 C 级两种组装方式。

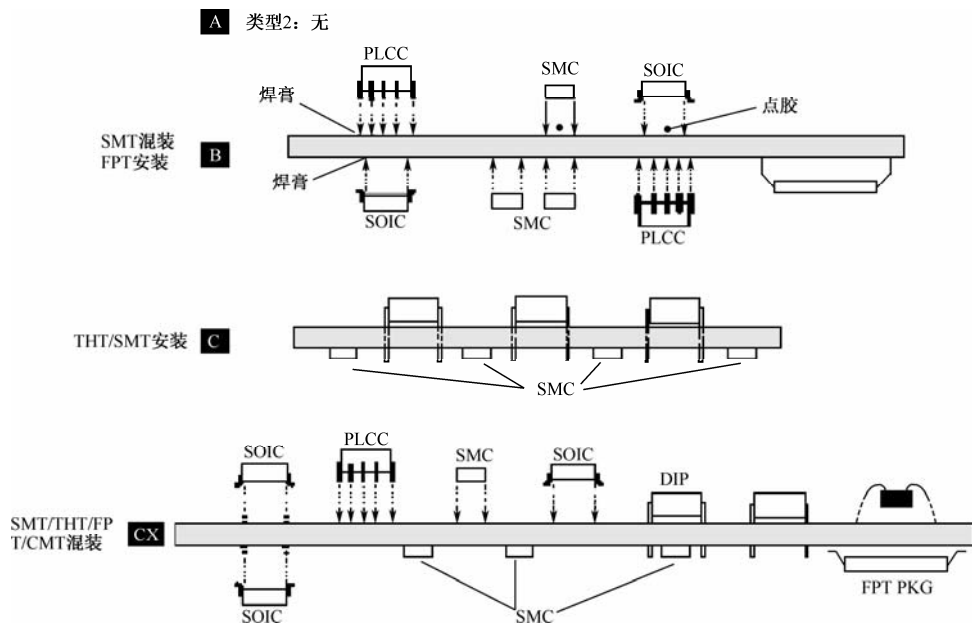


图 8.3 组装类型 II



其中, 组装类型 II 的 C 级方式是目前流行的混合安装中最简单的一种安装结构形式。它的工艺流程最短, 一般情况下只需采用一次波峰焊接工艺即可完成全部焊接过程。

当产品的体积、质量有特殊要求, 而且 PCBA 的几何尺寸受到严格限制时, 往往采用组装类型 II 的 CX 级方式, 其工艺流程目前有以下两种形式。

① A 面再流焊、B 面波峰焊。选择这种安装方式时, 应注意把大的 SMC/SMD、THC/THD、QFP、PLCC 及不适合波峰焊的元器件布置在 A 面, 而将适合波峰焊的完全密封的较小 SMC/SMD (如引脚数小于 28、间距不小于 0.8mm 的 SOT、SOP) 布置在 B 面。

② A 面再流焊、B 面再流焊+掩膜波峰焊或选择焊。

8.4.3 电子产品的组装方式选用原则

通常, 如果一个产品有如下要求时最好选用 SMT:

- ① 小型化、轻量化、高密度组装;
- ② 能够接纳大数量的内存, 几个大型、高引脚数的复杂 IC, 如 ASIC 和晶振;
- ③ 能够在高频与高速下工作;
- ④ 辐射很小或没有噪声, 抗 EMI 和 RFI;
- ⑤ 能够使用自动化大批量生产。

如果无上述要求, 且有便捷的清洗性、良好的视觉检测性、高的机械可靠性及低难度的手工返修要求时, 一般可选用 THT。现在, 大多数有 50 个以上的通孔元器件的 SMT 板都使用 SMT 与通孔技术相结合; 80% 的 SMT 与 20% 的通孔元器件的混合应用是很常见的。近年来, 100% 的 SMT 的组装数量也在迅速增加。

8.5 PCB可制作性设计

PCB 可制作性设计内容包括板材选用、厚度选择、叠层结构设计、布线密度、阻焊设计、丝印设计、表面处理、翘曲变形等。由于篇幅限制, 本节主要针对布线及阻焊设计进行重点说明, 以此来阐述其对焊接工艺的影响。

8.5.1 布线设计的注意事项

现代电子产品在进行布线时, 线宽和线间距、线与过孔、线与焊盘、过孔与过孔、线与穿孔焊盘等的距离都要考虑好。当元器件尺寸较大、布线密度较稀疏时, 应适当加大印制导线宽度及其间距, 并尽可能在空余的区域合理地设置接地线和电源线。一般来说, 功率 (电流) 回路的线宽、间距应大于信号 (电压) 回路; 模拟回路的线宽、间距应大于数字回路。

对于多层 PCB, 相邻两层的印制导线走向宜相互垂直、斜交, 尽量避免平行走向以减少电磁干扰; 同时, 布设模拟电路和数字电路时, 应将它们的地线系统和电源系统分开; 高速数字电路的输入和输出端的印制导线也应避免平行布线, 必要时, 其间应加设地线, 同时, 数字信号线应靠近底线布设, 以减小干扰; 模拟电路输入线应加设保护环, 以减小信号线与



地线之间的电容。

当 PCB 上装有高压或大功率元器件时,应尽量和低压小功率元器件分开,并确保设计合理、可靠。大面积导线(如电源或接地区域)应局部开设窗口。

8.5.2 布线设计的基本原则

布线的设计原则主要包括以下内容:

- ① 最短走线原则;
- ② 尽量少通过焊盘;
- ③ 避免尖角设计;
- ④ 均匀、对称的设计;
- ⑤ 充分合理地利用空间。

8.5.3 电源线与地线设计要求

由于 PCB 上铜箔和基板材料的热膨胀系数及导热速率差异极大,所以在焊接温度下,分布不均匀的铜箔层易使 PCB 产生较大的变形和翘曲。在设计时应满足下列要求:

- ① 大面积电源线及地线应画成交叉剖面线;
- ② 每层上的铜箔图形分布应尽可能均匀一致;
- ③ 不同层的铜箔图形分布应尽可能对称分布。

8.5.4 导线设计要求

1. 外层导线宽度与间距

在 THT 设计中,由于组装密度不高,所以对导线宽度与间距没有更高的要求,导线宽度主要取决于产品要求通过的电流。相邻导线间距的大小,既影响 PCB 相邻导线间的电绝缘性,又会导致焊接缺陷,如图 8.4 所示。对于较为密集型导线簇,当布线区间受到限制时,在保证电流密度要求的情况下,应尽量减少导线宽度以增大导线间距,减少桥连的产生。

在 SMT 设计中,由于元器件密度的增加,要求使用更细的导线密度和导线之间的间距。PCB 层数的增加要求使用更多的通路孔来增加层与层之间的必要连接。SMT 和细间距技术(FPT)对 PCB 几何参数的影响如表 8.1 所示。

表 8.1 封装与几何形状

几何参数	间距 (mm)		
	2.54	1.25	0.63
引脚数	8~64	8~124	84~244
贴装公差 (mm)	0.25	0.125	0.05
导线/间距 (mm)	0.3	0.15	0.125
焊盘 (mm)	1.5	0.75	0.63
孔 (mm)	1.0	0.40	0.40
圆环 (mm)	0.25	0.20	0.125

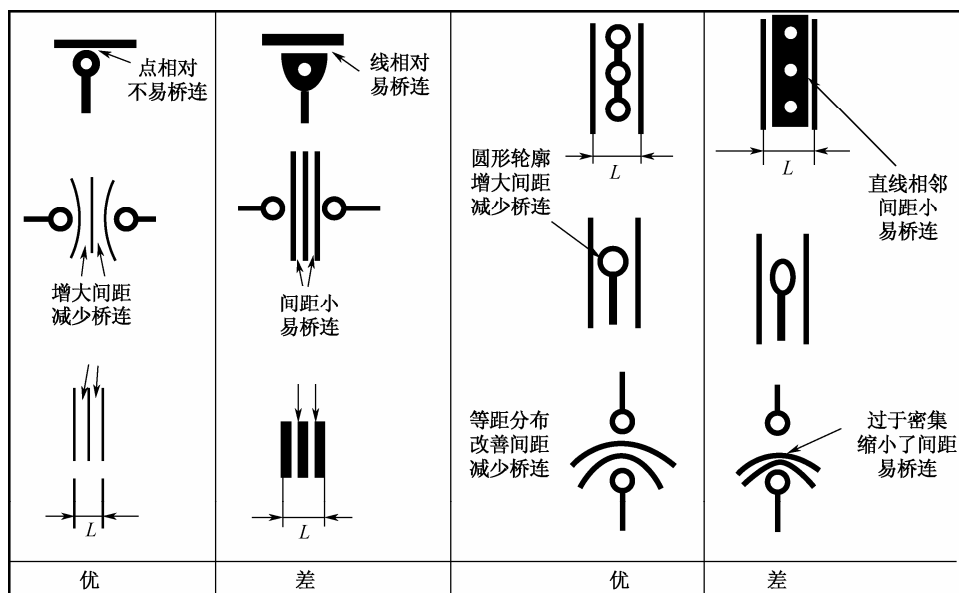


图 8.4 导线宽度和间距

目前, 0.15mm 的导线宽度/间距已经变得很普通, 基本上取代了 0.3mm 的线宽/间距, 作为一个普遍使用的几何参数, 如表 8.2 所示。随着越来越多的微间距器件在 PCB 上的使用, 0.125mm 的线宽/间距可能用于更多的 PCB 设计中以减少层数。

表 8.2 表面贴装导线宽度/间距与布线栅格

布线栅格 (mm)	最小导线间距 (mm)	制造公差 (mm)
0.63	0.30/0.20	0.10
0.50	0.20/0.20	0.10
0.40	0.20/0.15	0.05
0.30	0.15/0.10	0.05
0.25	0.10/0.10	0.05

2. 内层导线宽度与间距

SMT 设计使用越来越多的 0.15mm 导线, 大量使用 FPT 的设计也增加了 0.125mm 的导线和间距的使用。由于小宽度导线控制在 PCB 外层上较困难, 所以将这些窄的几何图形布置在多层 PCB 的内层会更好一点, 既可减少阻焊的需求, 又可提高制造合格率。一般使用较窄的几何形状是由于要减少层数的需要所推动的, 减少层数经常可以减小整个板的厚度, 改善小孔钻孔的纵横比。

3. 导线取向及形状

随着布线密度的大幅度增加, 间距越来越小, 这样就增加了焊接时相邻导线间产生牵连或短路的危险性, 尤其是在波峰焊接工艺中。因此, 设计者应使相互靠近的线系尽量取平行于焊接时的运动方向, 这样在波峰焊接时由于液态钎料和它们之间相互运动所产生的擦拭作



用, 就降低了钎料的危险性。

导线形状设计的优劣, 不仅对 PCB 的机电性能有较大的影响, 还是构成波峰焊接缺陷的重要因素, 如桥连、拉尖及钎料瘤等。导线形状要求平滑均匀、渐变过渡, 切忌成直角或锐角 (如图 8.5 所示), 以避免在尖角处附加应力而引起铜箔断裂、起翘、剥离, 形成焊疤等问题。

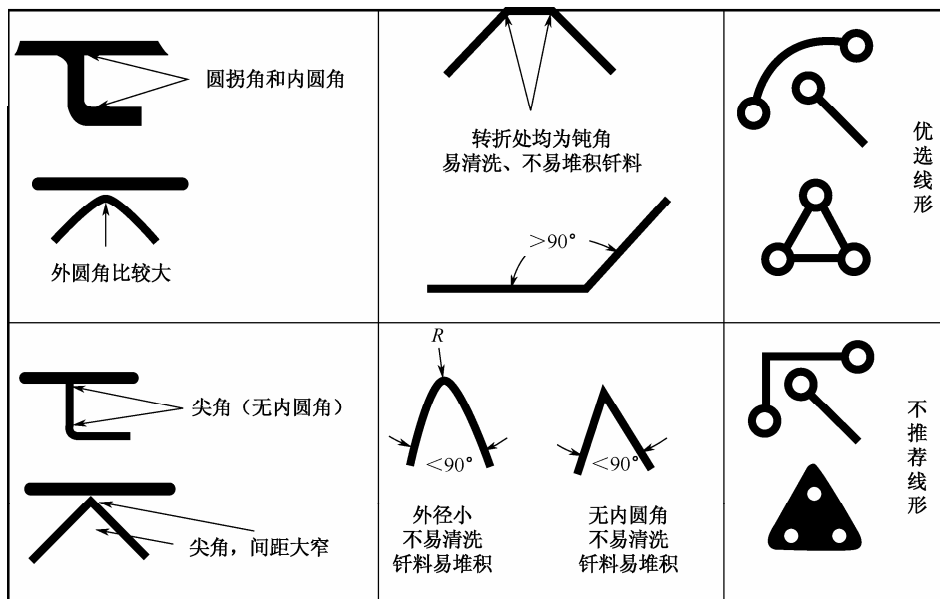


图 8.5 导线形状设计

8.5.5 阻焊膜设计要求

阻焊膜主要用来保护导电路径, 并对钎料润湿成形进行一定的限制, 防止桥连发生。

1. 波峰焊接工艺中阻焊膜设计遵守的原则

① 当两焊盘之间无导线通过时, 可采用阻焊掩膜窗孔形式, 如图 8.6 (a) 所示, 以防止桥连。

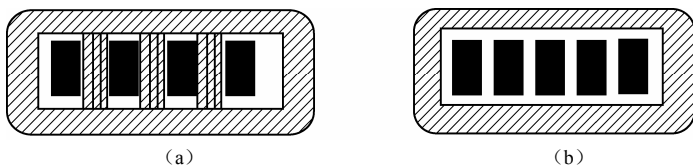


图 8.6 阻焊掩膜方式

② 采用阻焊掩膜时, 阻焊掩膜孔应稍大于焊盘, 如图 8.7 所示。

③ 当有两个以上靠得很近的 SMC 焊盘公用一段导线时, 应用阻焊膜将其分开, 以免钎料收缩时产生应力使 SMC 移位或拉裂, 如图 8.8 所示。

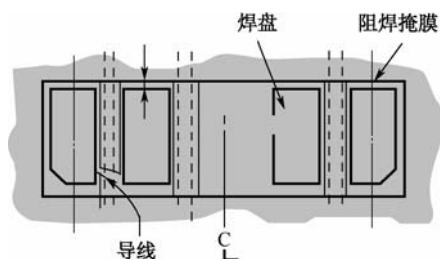


图 8.7 阻焊掩膜图形

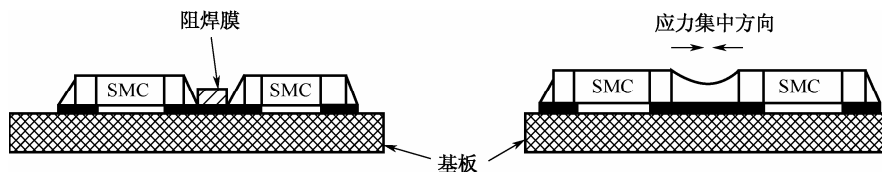


图 8.8 阻焊膜的应用举例

2. 再流焊接工艺中阻焊膜设计的特点

典型用于 BGA 封装的焊盘有两种类型，即非阻焊剂掩膜成形（NSMD）的焊盘和阻焊剂掩膜成形（SMD）的焊盘，如图 8.9 所示。这两种类型的焊盘都有各自的优、缺点。

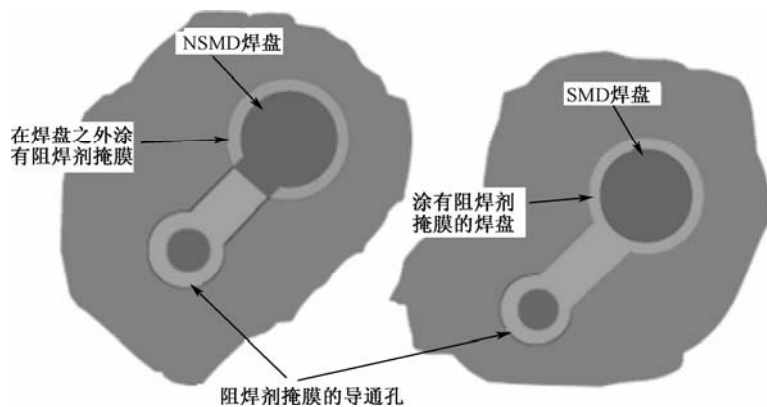


图 8.9 掩膜焊盘（SMD）和非掩膜焊盘（NSMD）

（1）非阻焊剂掩膜成形的焊盘（NSMD）

NSMD 焊盘要求的铜焊盘直径较小，因此对于布线和 PHT 孔而言，金属间的间隙就较大，而且对敷铜尺寸的控制比对阻焊剂掩膜尺寸的控制更加容易，焊盘精度高。这样可以获得更加均匀的表面涂层，尤其是 HASL 工艺的 PCB。焊盘周边无阻焊掩膜就会使焊膏流向焊盘边缘，因此也就没有应力集中的区域，这样就使焊点宽得多，有可能会延长疲劳寿命，但却会使焊点高度降低。

（2）阻焊剂掩膜成形的焊盘（SMD）

由于阻焊剂掩膜的重叠，SMD 焊盘要求采用直径较大的金属焊盘，这样才能确保 SMD



焊盘直径与 NSMD 焊盘直径相同。SMD 焊盘焊点较窄，但焊点高度会较大。由于铜表面积较大及阻焊剂的重叠，所以 SMD 焊盘与 PCB 的黏附面积较大。SMD 与 NSMD 相比，主要缺点就是可靠性低，使疲劳寿命降低到 70%，在阻焊剂开口处会出现高应力区域，焊盘精度低，偏移量大。

3. 阻焊膜设计不良导致的主要缺陷

① 阻焊膜与布线图配准不良，从而导致湿膜塌落而使焊盘表面和周围污染，造成焊点吃锡不良或大量的钎料球。

② 阻焊膜过厚，超过 PCB 焊盘铜箔厚度，再流焊时便形成吊桥或开路，如图 8.10 所示。

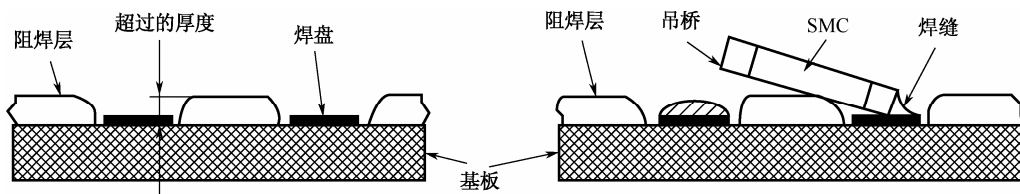


图 8.10 吊桥的形成

8.6 PCBA可组装性设计

8.6.1 基准点标记

1. 基准点定义

基准点标记是一个在 PCB 布线图的同一个工艺中产生的印制图特征。基准点和 PCB 布线图必须在同一个工序中蚀刻出来。

基准点标记为组装工艺中的所有步骤提供共同的可测量参考点。它允许组装使用的每一台设备精确定位电路图案。基准点有两种类型，即全局基准点和局部基准点。全局基准点标记用于在单块板上定位所有电路特征的位置。当一个多重图形电路以组合板的形式处理时，全局基准点称作组合板基准点，如图 8.11 所示。局部基准点用于定位单个元器件的基准点标记，如图 8.12 所示。

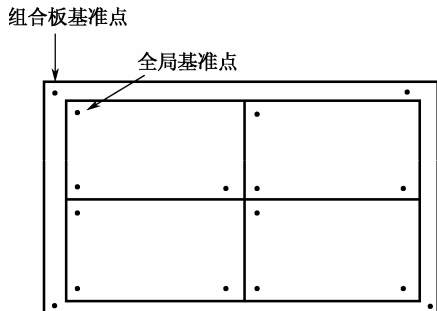


图 8.11 组合板、全局基准点

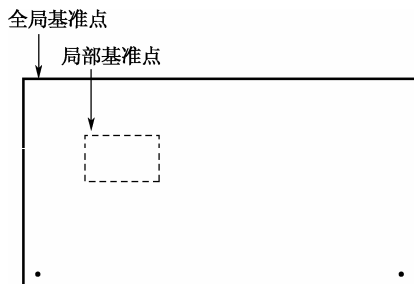


图 8.12 局部、全局基准点



基准点要求至少有两个全局基准点标记来纠正平移偏移和旋转偏移，这些点在 PCB 或组合板上一般位于对角线的相对位置，并尽可能地分开距离。如果空间有限，则至少可用一个基准点来纠正平移偏差。单个基准点应该位于焊盘图案的范围内，作为中心参考点。

2. 基准点标记设计规格

表面贴装设备制造商协会（SMTA）已将基准点的设计原则标准化，且这些原则得到了 IPC 的支持。

（1）形状

最佳的基准点标记是实心圆，如表 8.3 所示。

表 8.3 视觉系统的基准点类型

首选形状	●	实心圆，直径为 1.5mm
其他	■	实心正方形，边长为 2.0mm
	◆	实心菱形，边长为 2.0mm

（2）尺寸

局部、全局或组合板基准点的最小尺寸是 1.0mm，也有一些公司为组合板选用较大的基准点（1.5mm），最大直径是 3.0mm。最好保持所有的基准点为同一尺寸，且同一块 PCB 上的尺寸变化不超过 25 μm 。

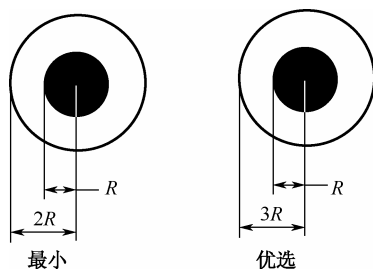


图 8.13 基准点空旷度要求

（3）空旷度

在基准点标记周围，应有一块没有其他电路或标记的空旷区域，其尺寸要等于标记的半径，首选等于标记的直径，如图 8.13 所示。

（4）材料

基准点既可以是裸铜，也可以是有机可焊保护层（OSP）、镀镍或镀锡或均匀的热风整平（HASL）钎料层。HASL 钎料涂层首选厚度为 5~10 μm ，最好不超过 25 μm 。如果使用阻焊层，则阻焊层不应该覆盖基准点或其空旷区域。值得注意的是，基准点氧化会降低其可读性。

（5）平整度

基准点的表面平整度应 $\leq 15\mu\text{m}$ 。

（6）边缘距离

基准点距离 PCB 边缘一般为 5.0mm，并满足最小的基准点空旷度要求。



(7) 对比度

基准点标记与 PCB 的基材之间出现高对比度时可达到最佳的性能。基准点空旷区域用以保持光学目标绝对不受阻焊的干扰。如果阻焊要在光学目标上,则可能造成一些视觉对中系统由于目标点的对比度不够而不起作用。对于所有基准点的内层背景必须相同,即如果实心铜板在基准点下表层,则所有基准点都必须这样。

8.6.2 工艺边及传送方向

PCB 工艺边是指为了辅助生产走板、焊接、检测而在 PCB 两边或四边增加的部分,不属于 PCB 的一部分,生产完成后可予以去除。工艺边一般不小于 5mm (单板或拼板),如图 8.14 所示,且正反面不能有任何元件及引脚、引线、通孔、焊盘等。如果 PCB 上的元器件过多,当工艺边 < 3mm 时,可在板边缘额外加 3mm 的辅助工艺边,利用邮票孔或 V 形槽分割。

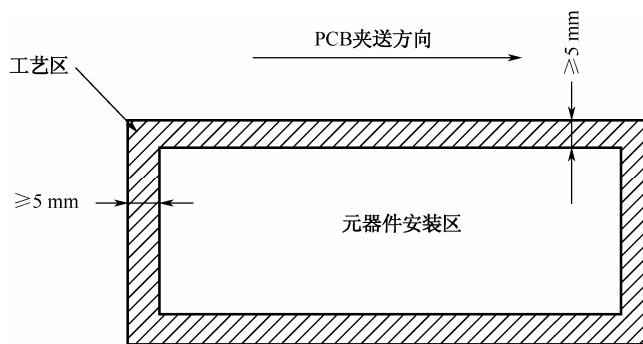


图 8.14 PCB 工艺边

SMT 工艺对 PCB 传送方向无特别要求, THT 工艺对 PCB 传送方向有严格要求。作为 THT 工艺元件布局的工艺基准, PCB 传送方向一般以长边为基准,以此减少变形 (如图 8.15 所示); 对于短边大于长边 80% 的或有工艺要求的 PCB (如高密插装连接器长边平行于短边), 也可考虑短边传送。

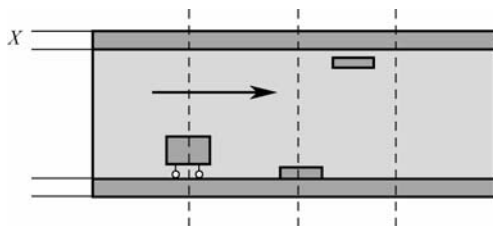


图 8.15 PCB 传送方向

8.6.3 元器件选型

1. 元器件选型的基本要求

选用性价比高的元器件是保证系统性能和经济指标的首要条件。但相同型号、相同性能



的元器件，又有不同的封装和包装形式，而 THT/SMT 生产线设备的技术性能恰好又对元器件的这些形式做出了一定的限制，因此了解和掌握 THT/SMT 生产线的技术条件，对电子产品设计中元器件的选择及 PCB 的设计优化来说非常重要。

同时，了解元器件的形状、尺寸及间距等因素，既能更好地利用现有设备，如插装/贴装设备、焊接检测设备等，同时又为元器件的合理布局（如对电气性能、生产工艺的考虑等）提供了依据。

2. 焊接工艺对元器件选型的要求

当表面贴装元器件应用于波峰焊接工艺中时，考虑其设计兼容性问题，必须对元器件进行一定限制，否则就会出现焊接质量问题。

适合于波峰焊接的元器件应具备：

- 耐温可承受 260°C 、 $3\sim 5\text{s}$ ；
- 标准化尺寸及公差；
- 焊端或引出端外露；
- 本体高度 $<6\text{mm}$ 且本体底部离板高度 $\leq 0.15\text{mm}$ SMT 元件。

满足上述条件的元器件主要包括：

- 片式阻容元件（0603 \sim 1206 封装）；
- 片式电感（非露线圈型封装）；
- 磁珠类元件（不建议使用，容易拉尖）；
- 无法点胶元件及底部不平片式元件（如 C 封装以上的钽电容、圆柱二极管、线绕电感等不可以放置在波峰焊接面）；
- 晶体管（MELF、SOT 封装）及 IC（中心距 $\geq 1.0\text{mm}$ SOP 封装）；
- 四边有引脚器件（如 SOJ、QFP、QFN、PLCC 等），不建议应用于波峰焊接，若采用必须从器件布局方面进行优化。

3. 清洗工艺对元器件选型的要求

用于清洁的最小元器件离板高度是基于该元器件的对角线距离。这个尺寸意味着可能聚集污垢的元器件表面积和离板高度的相互关系，其推荐值如表 8.4 所示。如果达不到最小离板高度，则对元器件的适当清洁是不可能的。在这种情况下推荐使用免清洗助焊剂。

表 8.4 元器件的离板高度

元器件对角线（mm）	元器件表面积（mm ² ）	元器件离板高度（mm）
≤ 50	≤ 2500	≥ 0.5
≤ 25	≤ 625	≥ 0.3
≤ 12	≤ 144	≥ 0.2
≤ 6	≤ 36	≥ 0.1
≤ 3	≤ 9	≥ 0.05



8.6.4 元器件布局

元器件在 PCB 上的安装布局设计是降低焊接缺陷的极重要一环。在进行元器件布局时,应尽量避免高应力区及热陷阱的出现,同时也要考虑快速组装及快速检查等可生产性。下面进行一些简单说明。

根据 DFM 要求, 元器件布局应满足下列要求。

① 元器件布置应远离挠度很多的区域和高应力区, 不要布置到 PCB 的四角和边缘上, 离开边缘的最小距离应 $\geq 5\text{mm}$, 如图 8.16 所示。

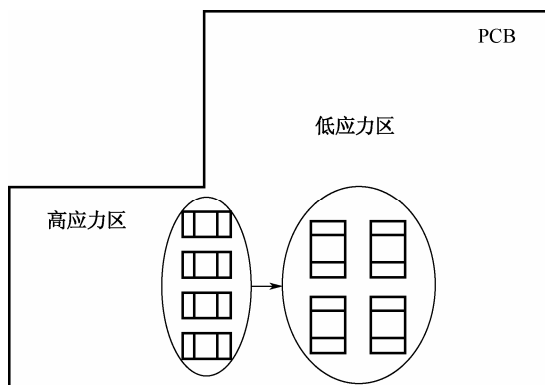


图 8.16 具有最小应力的元器件安装位置

② 贵重的元器件不要布置在靠近 PCB 的高应力区, 如角部、边、接插件、安装孔、槽及拼板的切割、豁口和拐角处, 如图 8.17 所示。

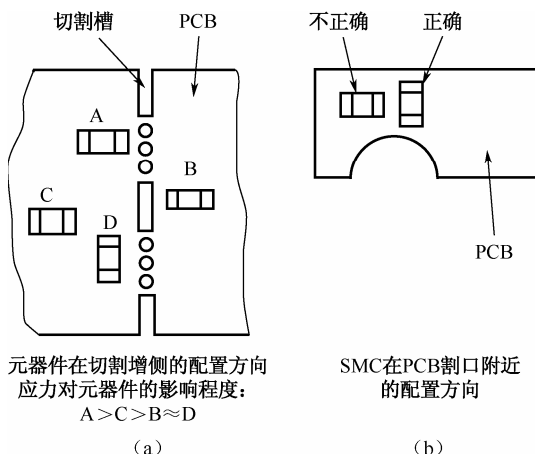


图 8.17 元器件在切割槽和豁口附近的配置方向

③ 较重的元器件应安排在 PCB 的支撑点附近, 以减少 PCB 的变形。

④ PCB 尺寸过大易翘曲, 安装时即使元器件远离 PCB 边缘, 缺陷仍然可能产生, 这是因为垂直于应力梯度方向的元器件最容易产生缺陷。应尽量避免采用尺寸过大的 PCB。

⑤ 元器件分布应尽可能均匀, 对热容量较大的元器件更要特别关注, 要采取措施避免



出现温度陷阱及 PCB 变形。

- ⑥ 大功率器件应均匀布置在 PCB 的边缘。
- ⑦ 大功率元器件附近应避开热敏元器件，并与其他元器件留有足够的距离。
- ⑧ 一个好的布局设计，除了要考虑热容量的均匀性外，还应考虑元器件的排列方向与顺序，其对焊接质量有着直接的影响，如图 8.18 所示。
- ⑨ 元器件应以相同的方式和方向排放，极性 & 字符排列应尽量一致，可以加快组装速度且更易发现错误。
- ⑩ 可在 PCB 的废边上安排测试电路图样，以便进行工艺控制。在制造过程中可使用该图样检测表面绝缘电阻、清洁度及可焊性等。

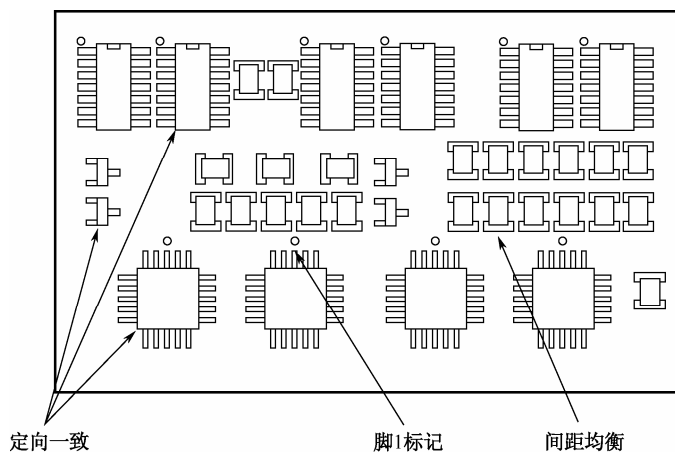


图 8.18 元器件的标准化布局

除满足上述要求外，在再流焊接工艺中，元器件排列还应有利于空气的流通；而在波峰焊接工艺中，元器件排列还应有利于液态钎料的流通。对于表面贴装元器件的布局应满足以下要求。

- ① 元器件轴线要相互平行或垂直（如图 8.19 所示）：所有无源元件要相互平行，长轴要垂直于进板方向；SOIC 与无源元件的较长轴要互相垂直。

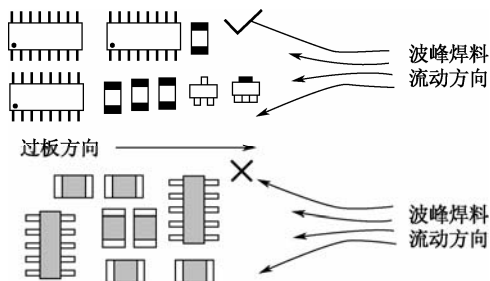


图 8.19 波峰焊接工艺中的元器件布局设计

- ② 片式元件的长方向，建议垂直于波峰焊的传送方向，且前后相邻的两个元件必须满足一定的间隔要求，小尺寸元件排在大尺寸元件前，以避免产生漏焊现象，如图 8.20 所示。
- ③ SOT 元器件的长轴方向要平行于进板方向，QFP 元器件必须与进板方向呈 45° 夹角，如图 8.21～图 8.22 所示。

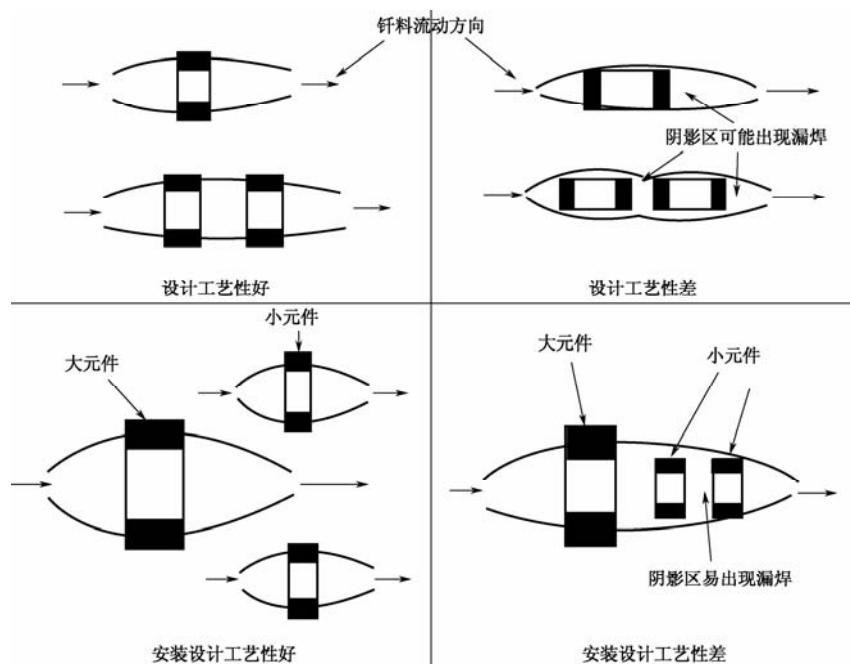


图 8.20 片式元件布局设计

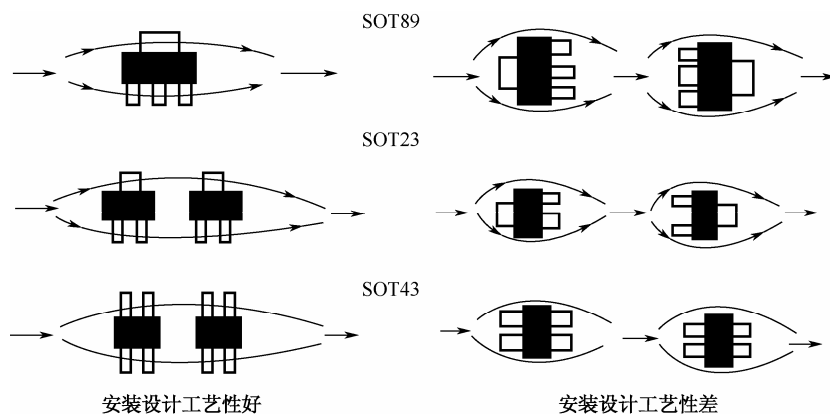


图 8.21 SOT 元器件布局设计

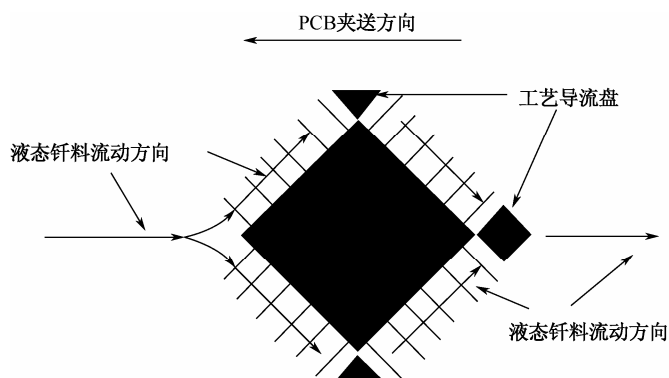


图 8.22 QFP 元器件布局设计

④ DIP 元器件及连接器摆放长轴方向必须与过板方向平行，如图 8.23 所示；若布局上有困难也可垂直放置。

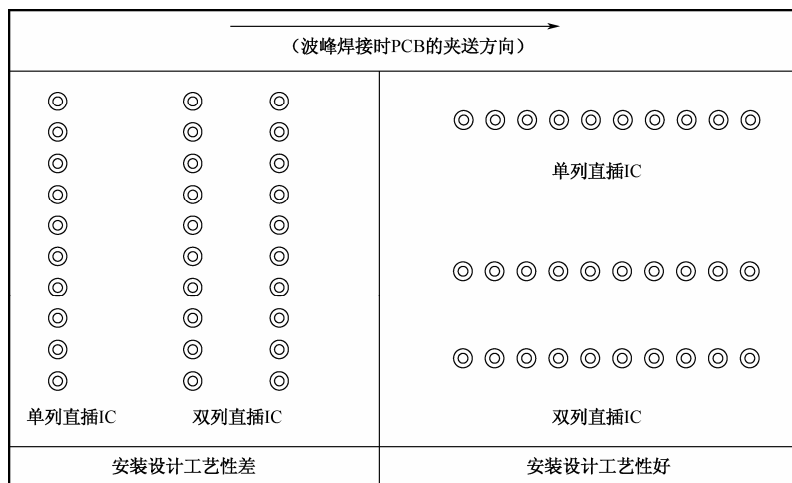
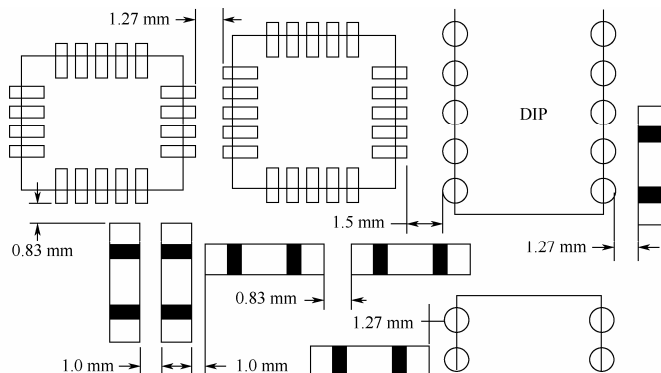


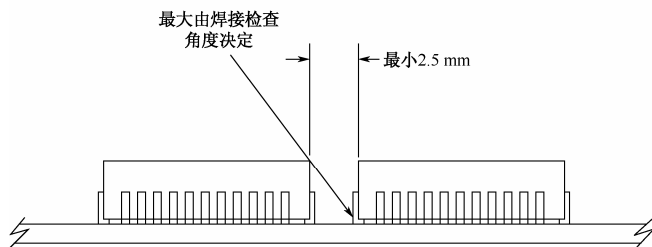
图 8.23 DIP 元器件布局设计

8.6.5 元器件间隔

焊盘结构设计对于表面组装的可靠性来说非常重要。设计者不应该忽视电子组装的可制造性、可测试性和可修理性等要求，最小的封装元器件之间的间隔要求满足所有这些要求。最大的封装元器件之间的间隔是没有限制的，越大越好。有些设计要求表面贴装元器件应尽可能靠近，基于经验，图 8.24 所示的例子都可满足可制造性的要求。



(a) 满足可制造性设计的元器件间隔



(b) 满足可测试性要求的元器件间隔

图 8.24 推荐最小的焊盘与焊盘间隔



元器件间距由 PCBA 安装密度所决定, 元器件间距的大小影响着焊接缺陷率(桥连), 尤其是波峰焊接工艺。因此, 只要有可能就应尽量取较大值。表 8.5 为典型元器件间距推荐尺寸, 设计时应遵循下述原则。

表 8.5 典型元器件间距推荐尺寸

	焊盘间距 L (mm/mil)		器件本体间距 B (mm/mil)	
	最小间距	推荐间距	最小间距	推荐间距
0603	0.76/30	1.27/50	0.76/30	1.27/50
0805	0.89/35	1.27/50	0.89/35	1.27/50
1206	1.02/40	1.27/50	1.02/40	1.27/50
≥ 1206	1.02/40	1.27/50	1.02/40	1.27/50
SOT 封装	1.02/40	1.27/50	1.02/40	1.27/50
钽电容 3216、3528	1.02/40	1.27/50	1.02/40	1.27/50
钽电容 6032、7343	1.27/50	1.52/60	2.03/80	2.54/100
SOP	1.27/50	1.52/60

- ① SMC/SMD 焊盘之间及到 SOT、SOP 引线焊盘的间隔应 $\geq 1.27\text{mm}$ 。
- ② 除 A (3216)、B (3528) 封装外的其他封装 (C、D、E 等) 钽电容及 SOIC 封装焊盘的间隔应 $\geq 1.52\text{mm}$ 。
- ③ 引线中心距为 $0.3\sim 0.63\text{mm}$ 细间距器件的安装焊盘周围应留出 2.54mm 以上的间隔。
- ④ 金属化孔或导通孔焊盘与 SMC 焊盘的间隔应 $\geq 1\text{mm}$ 。
- ⑤ 任何两种不同类型元器件的间隔应大于同种类型元器件的间隔较小者。

8.6.6 元器件焊盘设计工艺性要求

电子产品组装质量与 PCB 焊盘设计有直接、重要的关系, 尤其是 SMT 工艺。如果 PCB 焊盘设计正确, 贴装时少量的歪斜可以通过再流焊接时的自矫正效应纠正; 相反, 如果 PCB 焊盘设计不正确, 即使贴装位置十分准确, 再流焊接后反而会出现元器件位置偏移、立碑等焊接缺陷。

根据对各种元器件焊点结构的分析, 为了满足焊点的可靠性要求, PCB 焊盘设计应具备以下要素。

- ① 对称性: 两端焊盘必须对称, 这样才能保证熔融钎料表面张力的平衡。
- ② 焊盘间距: 确保元器件端头与焊盘有恰当的搭接尺寸, 焊盘间距过大或过小都会引起焊接缺陷。
- ③ 焊盘剩余尺寸: 元器件端头或引脚与焊盘搭接后的剩余尺寸必须保证焊点能够形成

弯月面。

- ④ 焊盘宽度：应与元器件端头或引脚宽度基本一致。

8.6.7 SMT工艺中的元器件焊盘设计示例

1. 无源器件（SMC）

（1）0402 矩形片式电阻

0402 矩形片式电阻封装焊端布局尺寸与 PCB 焊盘设计尺寸的关系如图 8.25 所示。尺寸数值的对应关系见表 8.6。

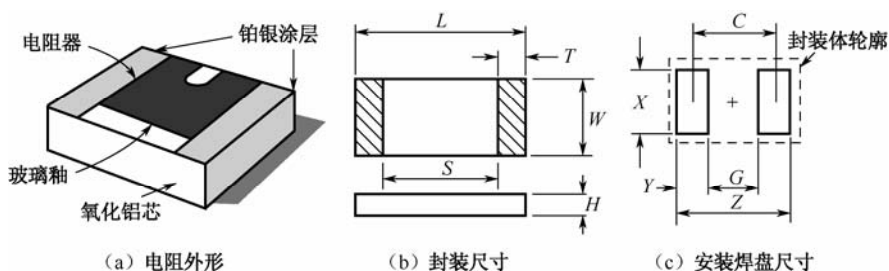


图 8.25 0402 矩形片式电阻封装尺寸与安装焊盘尺寸的对应关系

表 8.6 焊盘设计尺寸对应关系表

封装尺寸 (mm)	L	S	W	T	H
	1.00~1.10	0.40~0.70	0.48~0.60	0.10~0.30	0.40
焊盘尺寸 (mm)	Z	G	C	Y	X
	2.20	0.40	1.30	0.90	0.70

（2）0402 矩形片式电容

0402 矩形片式电容封装电极布局尺寸与 PCB 焊盘设计尺寸的关系如图 8.26 所示。尺寸数值的对应关系见表 8.7。

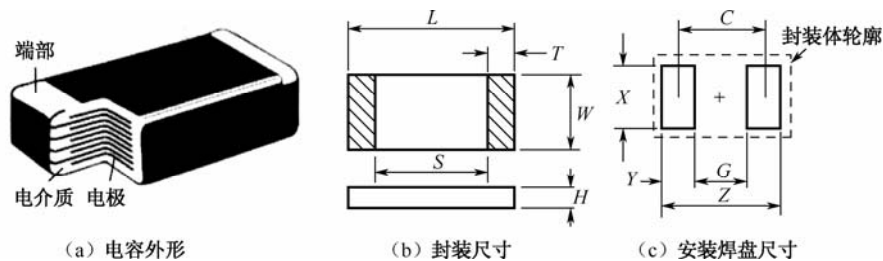


图 8.26 0402 矩形片式电阻封装尺寸与安装焊盘尺寸的对应关系



表 8.7 焊盘设计尺寸对应关系表

封装尺寸 (mm)	L	S	W	T	H
	0.90~1.10	0.30~0.65	0.40~0.60	0.10~0.30	0.60
焊盘尺寸 (mm)	Z	G	C	Y	X
	2.20	0.40	1.30	0.90	0.70

(3) 0805 圆柱形元器件

0805 圆柱形元器件封装电极布局尺寸与 PCB 焊盘设计尺寸的关系如图 8.27 所示。尺寸数值的对应关系见表 8.8。

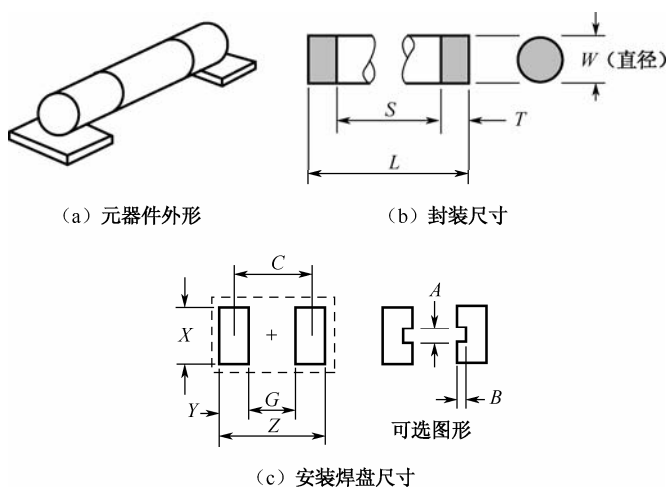


图 8.27 0805 圆柱形元器件封装尺寸与安装焊盘尺寸的对应关系

表 8.8 焊盘设计尺寸对应关系表

封装尺寸 (mm)	L		S		W		T	
	1.90~2.10		1.16~1.44		1.35~1.45		0.23~0.37	
焊盘尺寸 (mm)	Z	G	C	Y	X	A	B	
	3.20	0.60	1.90	1.30	1.60	0.50	0.35	

2. 有源器件 (SMD)

(1) 塑料无引线封装 (PLCC)

PLCC 封装电极布局尺寸与电路板焊盘设计尺寸的关系如图 8.28 所示。

(2) 球栅阵列封装 (BGA)

BGA 封装焊盘设计对于确保完美焊点的形成, 防止桥连、开路等缺陷, 获得最佳可靠性, 将起到决定性作用。BGA 焊盘大小、图形定义、对位符号及导通孔的尺寸及位置都对组装可靠性有较大的影响。例如, BGA 焊盘中的导通孔将导致焊点中产生空洞, 并影响到可靠性。现有数据证明, 对于 0.75mm 钎料球的标准 25~35mm 封装, 不存在由于空洞带来



可靠性风险的问题。空洞的主要原因之一是焊膏截留孔（包括导通孔、盲孔及微过孔）内的气体及助焊剂挥发逸出，如图 8.29 所示。

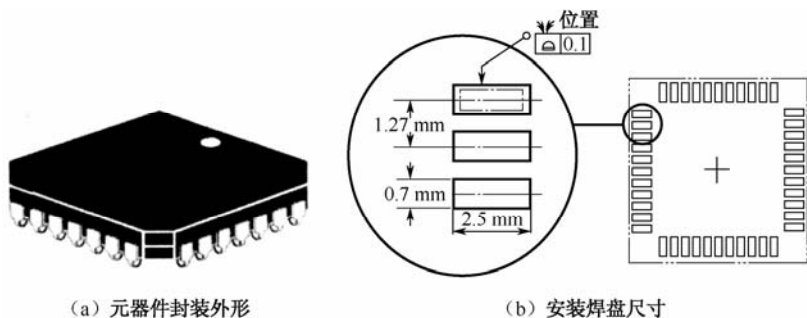


图 8.28 PLCC 封装尺寸与安装焊盘设计尺寸的对应关系

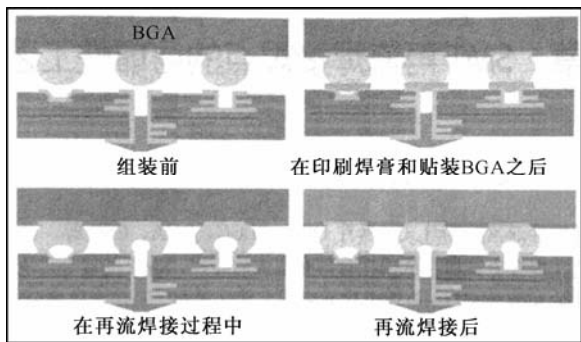


图 8.29 焊盘中的导通孔工艺说明

施加有钎料球的元器件基板图形和组装结构焊盘图形的直径应尽量相同。元器件制造商已确定元器件的焊盘图形或焊盘直径应比钎料球直径稍小。应根据钎料球尺寸确定降低的量，并用这个量来确定焊盘的平均值。表 8.9 给出的信息是焊盘直径数据及其变量。

表 8.9 焊盘设计尺寸近似值

标称钎料球直径 (mm)	降低的量	标称焊盘直径 (mm)	焊盘变量 (mm)
0.75	25%	0.55	0.50~0.60
0.60	25%	0.45	0.40~0.50
0.50	20%	0.40	0.35~0.45
0.45	20%	0.35	0.30~0.40
0.40	20%	0.30	0.25~0.35
0.30	20%	0.25	0.20~0.25

8.6.8 THT工艺中的元器件焊盘设计示例

1. 表面贴装元器件（SMC/SMD）

由于 SMT 元器件波峰焊接的特殊性，情况比 THT 波峰焊接复杂得多。SMT 波峰焊必须处理好气囊遮蔽效应和阴影效应。桥连和漏焊是 SMT 波峰焊接中两个对立的方面，必须



要妥善处理。

下面列举 IPC-SM-782 标准中对 SMT 元器件有关波峰焊接焊盘设计准则的工艺性约定如下。

(1) 无源器件 (SMC)

无源器件焊盘规范图设计准则如图 8.30 及表 8.10 所示。

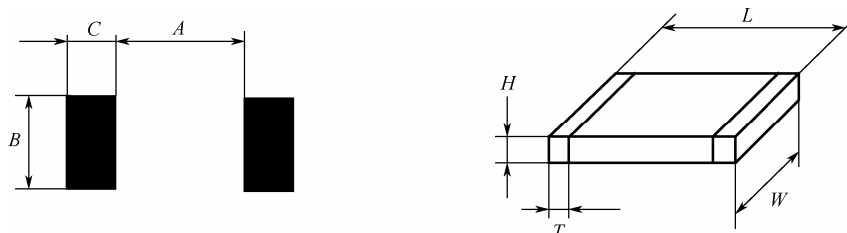


图 8.30 无源器件与安装焊盘尺寸的对应关系

表 8.10 焊盘设计尺寸对应关系表

焊盘长度 $B=W_{\max}-K$
焊盘宽度 $C=H_{\max}+T_{\min}+K$
焊盘间距 $A=L_{\max}-2T_{\max}-K$
常数 $K=0.254\text{mm}$

(2) 扁平封装器件

扁平封装器件 (SOP、QFP 等) 在采用波峰焊接工艺时, 其焊盘图形及尺寸对应关系如图 8.31 和表 8.11 所示。

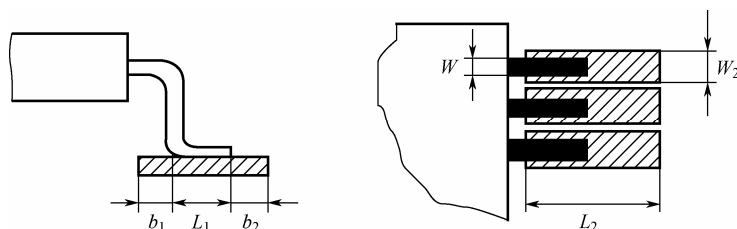


图 8.31 扁平封装器件波峰焊接用焊盘

表 8.11 焊盘设计尺寸对应关系表

$L_2=L_1+b_1+b_2$
$B_1=0.3\sim0.5\text{mm}$
$b_2=0.6\sim1.0\text{mm}$
引线间距 $\leq 1.0\text{mm}$: $W_2 \leq W$
引线间距 $\geq 1.27\text{mm}$: $W_2 \leq 1.2W$

(3) 圆柱形元器件 (MELF)

波峰焊接时规定采用长方形焊盘, 焊盘图形参数可参考图 8.32 和表 8.12。

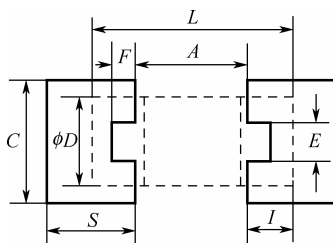


图 8.32 圆柱形元器件波峰焊接用焊盘

表 8.12 焊盘设计尺寸对应关系表

$C=D \times (0.7 \sim 1.0) \text{ mm}$
$S=L_{\max} - (L_{\min} - 2I)$
$A=L_{\max} - 2S=L_{\min} - 2I$

(4) 小外形封装器件 (SOIC)

对于小外形晶体管,应在保持焊盘间的中心距等于引线间的中心距基础上,使每个焊盘四周的尺寸再分别向外延伸至少 0.4mm,以改善焊点的轮廓敷形。对于小外形封装器件和电阻网络焊盘设计可参考图 8.33 和表 8.13。

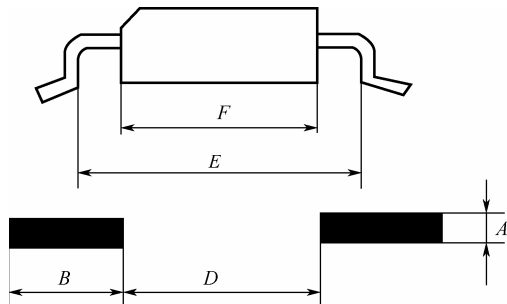


图 8.33 小外形封装器件波峰焊接用焊盘

表 8.13 焊盘设计尺寸对应关系表

$D=F-K(0.25)$
A—一般为 0.5~0.8mm
B—一般为 1.85~2.15mm

(5) 其他元器件

其他元器件的焊盘尺寸设计原则可参考前述内容。一般对于不属于细间距范畴的元器件,焊盘的取值总可以比引脚宽度大 0.125mm 左右。

2. 通孔插装元器件 (THC/THD)





(1) 焊盘形状设计

焊盘形状一般要考虑与孔的形状相适配,而孔的形状一般又要与引线的形状相对应。常



见的基本焊盘形状及其对焊点轮廓敷形的影响，具体见表 8.14。

表 8.14 常见的基本焊盘形状及其对焊点轮廓敷形的影响

形状	图例	优先元件引线弯曲方向	焊点轮廓敷形	备注
泪滴形		朝长端	规则并接近圆形	增大接触区的良好设计
圆形		任意方向	规则并成圆形	通用型
矩形		朝一角或长端	不规则	不广泛采用
长圆形		朝长端	不规则	IC 焊盘用

(2) 孔径间隙设计

引线直径与焊盘孔径的配合是否恰当，不仅直接影响焊点的力学性能和电气性能，而且是造成焊点圆角高度不理想的重要原因，还是影响焊点出现空穴现象的因素。图 8.34 所示是日本学者纲岛瑛一在综合了浸焊试验结果后，给出的不完全接合率与间隙大小之间的关系。由图可知，当间隙在 0.2mm 以下时，接合成功率可达 98.3%~99.5%。随着间隙值的增大，接合成功率降低，当间隙值超过 0.4~0.5mm 时，接合成功率快速下降。

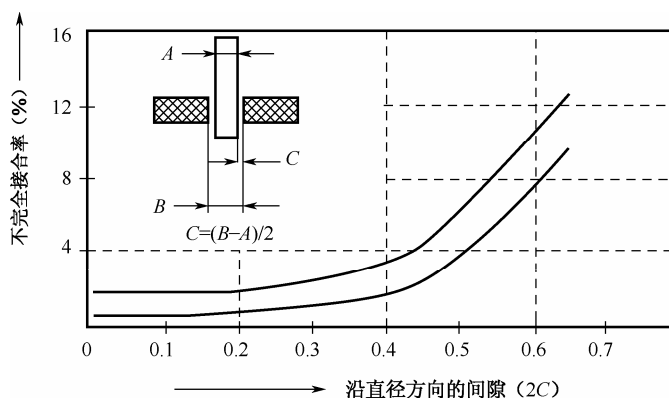


图 8.34 波峰焊接成功率与直径方向的间隙大小关系

(3) 焊盘与孔直径的配合设计

焊盘与孔直径配合不当，将严重影响焊点形状的丰满程度，并且会对单面 PCB 焊点的机械强度造成影响。如图 8.35 所示为无金属化孔单面 PCB 理想圆角轮廓及浸润高度 H 的构成条件。钎料浸润高度 H 主要受焊盘大小和形状、孔直径、引线直径、引线伸出焊盘的高度及焊盘和导线的配合等诸多因素的综合影响。一般认为通孔焊盘直径为孔径的 2~2.5 倍，是焊接比较理想的条件，而 2.5~3 倍时易形成合格焊点。

(4) 焊盘与印制导线的配合设计

为了在波峰焊接中获得良好的圆角或润湿角和焊盘热量的均衡，焊盘与印制导线的图形设计可参考图 8.36。

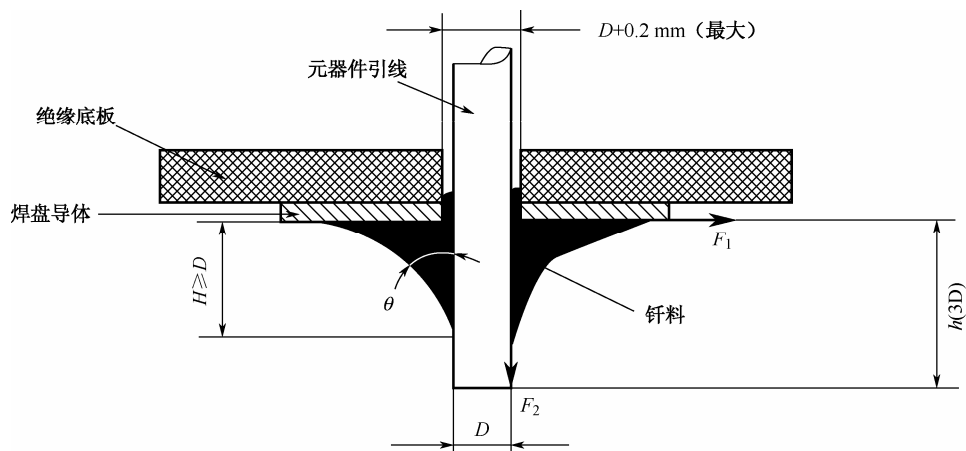


图 8.35 无金属化孔单面 PCB 理想圆角或润湿角及浸润高度的构成条件

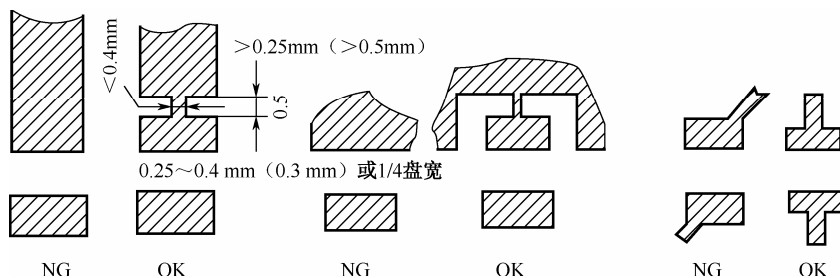


图 8.36 焊盘与印制导线的连接

8.6.9 其他

PCBA 可组装性设计除上述内容外,还包括导通孔设计、留孔焊盘设计、测试焊盘设计、焊盘与导线及孔的设计、引线伸出焊盘的高度要求等,同时兼顾热工方面的考虑和可靠性方面的考虑,如散热盘设计、避应力设计、拼板设计、防撞设计等,本节不再说明,具体可参考相关标准。

思 考 题

1. 简述 PCBA 可制造性设计的主要内容。
2. 举例说明不同元器件组装方式对焊盘设计的影响。
3. 简述波峰焊接工艺中元器件引脚直径与安装孔径的间隙要求。

第9章 焊点接头设计及其可靠性



本章要点

- 📁 电子装联可靠性
- 📁 焊点的界面质量模型及焊点接头模型
- 📁 焊接接头结构设计对焊点可靠性的影响
- 📁 焊接接头机械强度的影响因素
- 📁 焊接接头三要素与焊点可靠性
- 📁 焊点可靠性评估方法



9.1 电子装联可靠性

焊接之后,装联组件形成了一个复杂的连接体系。多种材料可能出现在同一体系之中,如 PCB 基板通常是纤维性增强的高分子聚合材料,芯片的载体或封装可能是陶瓷材料,而 PCB 焊盘、元器件引脚和钎料合金则是典型的金属材料。同时,随着电子产品向多功能、轻薄小型化的方向发展,封装密度也有了极大的提高,体系所包含的元器件数量、种类及其布置方式、PCB 材料、层数和导线尺寸,焊点的数量、形状和尺寸等较之以往都发生了很大变化。焊接中的高温作用和助焊剂的化学变化,组件服役期的振动、冲击和温度循环、工作环境介质的长期作用等都可能引起焊接体系的失效,即丧失其应有的功能。失效既可能发生在焊接部位,也可能发生在 PCB 或元器件方面。失效的形式可能是焊点连接的机械性能或电性能退化,甚至焊点断裂(连接的机械性能与电性能常常相互关联),也可能是元器件失效、PCB 或其导线开裂;失效的主导因素可能来自机械、热、电或其他物理的或化学的因素。这些都属于电子装联的可靠性问题。

9.1.1 机械可靠性

机械可靠性主要涉及焊点的连接可靠性,而对连接可靠性具有决定性作用的是焊点的力学性能。焊点既要保证在过载或冲击载荷下不被破坏,又要保证在高温或变动应力作用下其连接性能不被降低,因此可以说机械可靠性的核心问题就是连接强度。焊点体系由钎料合金、被焊金属和焊接界面共同组成,因此焊点的机械可靠性也受到这三方面材料的力学性能及界面连接强度的共同影响。此外,焊缝尺寸、焊接面积等焊点的几何因素和载荷的加载速率或形变速率这两个非材料因素也对焊点的性能有所影响。

从宏观上看,在对焊点可靠性进行研究时可将焊点体系作为一个整体来对待,如在某些情况下将焊点作为一个复合材料系统进行整体研究,然而将焊点体系各相分开考虑却有助于从材料的破坏机理上理解影响焊点可靠性的因素。材料的力学性能与材料特性、使用温度和载荷特点有关。常见的材料的基本力学性能指标表达了材料在常温静载条件下的力学性能。静载荷与冲击载荷的区别主要在于加载速率不同。加载速率是载荷的施加速率,一般用单位时间内应力的增加量表示。同时,加载速率提高,材料的形变速率也相应会提高,因此也常用形变速率表达加载速率。形变速率是材料单位时间内的变形量,一般用应变率表示,它是单位时间内应变的变化量。对于金属材料,通常把应变率低于 10^{-4}s^{-1} 的加载过程作为静载荷处理,超过此范围时材料的力学性能就将发生明显变化,这时需要考虑高加载速率带来的影响(韧性影响)。静载荷是大小、方向不变或近似不变的载荷,动载荷是大小或大小和方向均随时间显著变化的载荷,材料在动载荷的作用下也会表现出不同的力学特点(疲劳特点)。同时,材料在高温和常温时的力学性能也不大相同,因此在高温环境下使用的材料还要考察其高温力学性能(蠕变性能)。对于焊点可靠性来说,蠕变和热疲劳特性具有特殊意义,它们是决定焊点机械可靠性的主要方面。



当将焊接界面层作为焊点体系中的一相材料看待时,其微观组织、尺寸、形态和物理或机械的性能,以及它与母材或焊料合金的界面结合强度等许多数据还有待研究。即使将体系分开而仅从各项材料的力学性能方面考虑,上述众多的影响因素也使得若不借助有限元分析等几乎无法定量分析焊点的变形乃至破坏,因此,实际焊点的可靠性分析和预测是个很复杂的工作。

9.1.2 电化学可靠性

无论是采用免清洗助焊剂还是在焊后使用了助焊剂清洗工艺,装联组件表面仍可能残留具有一定化学活性的、微量的焊接残留物。在潮湿环境工作的组件表面可能会凝结出一层水膜,当离子型残留物溶解到水膜中之后,在一定的偏电压作用下会在 PCB 导电条之间发生电化学反应,引起表面绝缘电阻下降,由此也就引发了装联组件在服役期间的可靠性问题。影响电化学可靠性的主要原因包括离子的电迁移和金属的电化学腐蚀。

离子的电迁移是指离子在外电场作用下发生定向运动的现象。当电解质溶液通电后,溶液中承担导电任务的阴、阳离子分别向阳、阴两个电极移动,从而使得在两个电极表面上分别发生氧化和还原反应。根据电极是否参与到界面上反应,电迁移还会呈现出不同的复杂情况。

在电子产品服役期间,如果工作环境的湿度很大并在 PCB 表面形成一层水膜,则焊点的焊料合金、电路的金属导体(包括 PCB 导电条、元器件引脚等)、残留在 PCB 表面的金属盐等离子型污染物,甚至在焊接时溶解到 PCB 基材中的污染物就可能溶解到水膜中而解离出各种离子,从而在 PCB 表面形成电解质溶液。如果在电路工作时,PCB 导电条上形成了一定电位差,于是此偏电压和电解质溶液就构成 PCB 表面上的一个电解池,PCB 导电条相当于电解电池中的电极。在偏电压的作用下,此电解池中也将发生离子电迁移和相应的氧化、还原反应:在阴极发生正离子的还原反应,其结果是金属离子在阴极析出、沉积;在阳极发生负离子的氧化反应,负离子在阳极析出。同时,阳极材料(Cu)也可能不断溶解、消耗。

PCB 表面的电解液对装联可靠性的影响主要表现在以下方面:首先,溶液的离子浓度很高时就会降低 PCB 基板的表面绝缘电阻(SIR),沿此表面层有可能产生漏电流;其次,如果长时间的离子电迁移使阴极还原的金属在 PCB 表面形成树枝状的晶体,树枝状晶体沿 PCB 表面的不断生长同样会降低表面绝缘电阻,极端情况下还会与阳极接触而引起电路短路;同时,阳极的不断消耗则减少了导电条的横截面积,极端情况下会因阳极耗尽而引起电路开路。因此,离子的电迁移是影响装联组件服役期可靠性的重要因素。

电化学腐蚀是指金属表面与周围介质发生化学作用而遭受破坏的现象。金属表面与周围气体或非电解质液体等发生化学作用而引起的腐蚀称为化学腐蚀。化学腐蚀时没有电流产生。如果金属表面与周围介质,如潮湿空气或电解质溶液等相接触,因形成微电池而发生化学作用所引起的腐蚀称为电化学腐蚀,它与电迁移的区别是没有外加偏电压的作用。由于空气存在一定的湿度,因此电化学腐蚀也是一种常见的金属腐蚀现象。装联组件即使不工作,如果长期保存在湿度较大的环境中也可能发生这种腐蚀。



9.2 焊点的界面质量模型及焊点接头模型

9.2.1 软钎焊接焊点质量对电子产品可靠性的影响

在整个电子产品的装联工艺过程中，软钎焊的权重可达 60%以上，它对电子产品的整体质量和可靠性有着特殊的意义。软钎焊影响电子产品制造质量的主要根源体现在以下几个方面。

- ① 电子产品制造的所有质量问题中，由焊接不良造成的概率高达 90%。
- ② 现代高密度电子产品互连质量问题中，由焊接不良导致的概率甚至进一步上升到 90%以上。
- ③ 随着封装的微细化，uBGA、CSP、FCOB、0201、01005 等微小型元器件的大量应用，“微焊接”技术在高密度组装中发挥着越来越大的作用。由于焊点的微细化，“微焊接”技术基本上属于一种“无检查”工艺，在这样的条件下，焊接接合部的缺陷必然将成为电子产品在制造中质量不良的最主要形式。

“微焊接”工艺设计中要对可能发生的不良进行预测，找到其根本原因，必需的前提是已经存在一个“微焊点”质量模型。理想焊点的质量模型向我们揭示了为确保焊点的可靠性，焊点必须达到的质量条件。它也向我们揭示了微焊接工艺过程控制的方向和依据。只有按照理想焊点的质量模型要求所建立起来的可接受性要求，才能真正确保焊点的微观结构质量，它对提高产品系统整体质量具有极为深远的意义。

9.2.2 理想焊点的界面质量模型

日本学者菅沼克昭从可靠性观点出发归纳出了理想焊点界面的质量模型，如图 9.1 所示。

- ① 所用 PCB 基板具有最小的 Z 轴方向的 CTE。
- ② 平坦且厚度 $<5\mu\text{m}$ 的界面合金层。
- ③ 钎料体内均匀地分布着粒度 $<100\text{nm}$ 的微细强化离子。
- ④ 钎料体的钎料组织内不存在或极少存在偏析金属相。
- ⑤ 钎料体内金属相间和焊点表面存在弱的氧化膜。

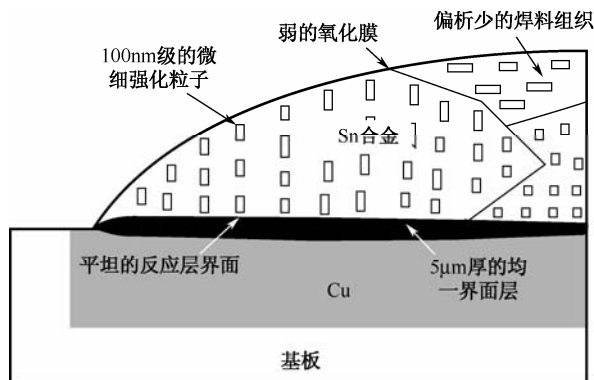


图 9.1 理想焊点界面的质量模型



9.2.3 焊点的接头模型

实践证明,能否获得可靠性高的焊点,其中一个重要因素就在于是否有完善的接头设计。日本学者统计 40%~50%的焊点缺陷是由于接头设计不合适而引起的。即使可焊性非常好的材料,如果接头设计有缺陷,则焊点的可靠性也不会高。

界面的连接依靠的是钎料对两个基体金属表面的润湿作用。钎料是焊接中的连接材料,它固着于基体金属表面,因而提供了金属的连续性。除此之外,钎料还用于在被桥连起来的两个被润湿的表面,构成两金属间的连接环节。此时,钎料的性能决定了整个焊接接头的性能。如图 9.2 所示为焊接接头的结构模型,在焊接中的高润湿作用下形成连接界面。熔点较低的钎料是良好的填充金属,能够导电和导热,并具有延展性、光泽等所有金属性能。

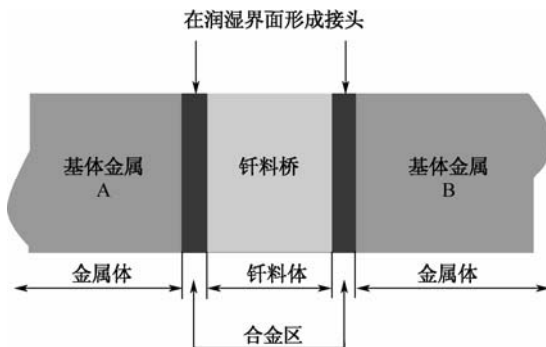


图 9.2 焊接接头的结构模型

SnPb 钎料的可延展性和该组分钎料中的大多数合金在室温或接近室温情况下的退火能力,使焊接接头中钎料成为极好的应力连接材料。由于 SnPb 钎料具有吸收并随时释放应力的能力,使得装配件在承受振动和受热时,在焊接接头中形成的很大的应力被释放出来,从而避免了装配件的损坏。假如该应力未被释放而被传递到强度较低的元器件上,将导致连接处破裂。由此可见,SnPb 钎料强度低这个“弱点”实际上是其优点。

相关资料中列举 SnPb 钎料的物理性质时,其数据只适用于钎料体本身,而不适用于焊接接头中的钎料。除非在界面或分层处形成了过量的使填充钎料变脆和降低强度的金属间化合物,否则溶解硬化的效果将是提高而不是降低焊接接头的强度。

电子软钎焊工艺中的焊点接头设计需要考虑两个问题,即机械强度要求和电气上的载流能力。在 PCBA 组装焊接中广泛采用搭接接头和套接接头,如图 9.3 (a) 和 (b) 所示。搭接接头是再流焊接技术中极为常用的焊接接头,两个被焊基体金属搭接在一起,填充于其间的钎料把二者连接为一体。这种接头的强度随搭接面积的变化而变化,在直拉力作用下,接头承受剪切应力作用;在弯曲作用下,接头承受拉伸或压缩作用力。这种搭接接头可用改变搭接面积的方法来满足组装件对接头的强度和电气等性能的要求。套接接头是波峰焊接技术中常用的焊接接头,是孔和引线的焊接,在直拉力作用下,该接头主要承受剪切应力。

不论采用哪种接头,确保钎料承受的应力沿润湿表面均匀分布都是很重要的。如果因为设计不当而产生了应力集中现象,则某一时间仅有整个润湿面积中的一部分承受应力,当应力超过了填充钎料的极限强度时,将使焊接接头产生裂纹。由于不能利用填充钎料的总强度,



该裂纹会从一个应力区扩展到另一个应力区。因此，在产生应力集中的情况下，认为用增加焊缝中填充钎料的办法能解决应力集中的问题是错误的，这只能改变产生故障的初始位置。同时，建议搭接接头上不应有弯曲作用，因为其能产生局部应力集中，并使钎料撕裂，产生裂纹。

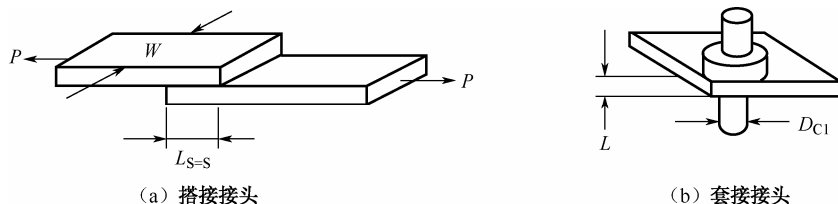


图 9.3 焊接接头

为了获得良好的焊接接头，另一个需要考虑的重要因素是间隙（接头中钎料的厚度），它对焊接接头强度的影响很大。间隙的大小受两方面的要求支配：一方面应使助焊剂和钎料良好地进入焊接区（这要求间隙不能太小）；另一方面应在毛细管和表面能的作用下使钎料保持在焊缝中（这要求间隙不能太大）。其次，焊接接头形成过程中发生的固溶硬化过程，在很大程度上增强了钎料强度。

正确的焊接接头设计还涉及使钎料从被润湿的表面完全排开气体和助焊剂，形成完全实心和均匀填充钎料的保证措施。否则，空气或助焊剂蒸汽的膨胀将产生气阱，使焊接接头横截面的强度显著降低，不能获得所要求的强度。此外，还要考虑焊接接头的两种基体金属在膨胀系数、延展性和其他重要性能方面的差异。

9.3 焊接接头结构设计对焊点可靠性的影响

9.3.1 焊接接头的几何形状设计与强度分析

接头设计决定了焊接接头的性能，包括导电性、机械耐用性（强度）、散热性、加工的工艺性、可维修性、可目视检查性。

前 3 项性能主要取决于材料和几何形状的设计，其中机械耐用性在很大程度上还取决于所采用的焊接工艺方式。由于钎料和被其润湿的基体金属间的相互作用改变了金相组织，在此情况下，焊接时间、焊接温度是与焊接操作有关的极重要的因素。钎料合金的耐用性取决于钎料作为应力连接材料的能力。通常，金属界面的强度比填充钎料的强度要高得多。在此情况下，最薄弱的环节就是填充钎料本身。但是假如基体金属和钎料的金属元素形成金属间化合物，导致过份合金化和过多的金属间化合物晶体，则有损于机械耐用性，并会降低其长期可靠性。另外，应关注焊接接头中的钎料能否长期耐受预期的大幅值应力，因为即使这些应力低于钎料的正常屈服强度，也可能引起蠕变现象，且当温度接近再结晶温度时，更容易产生蠕变现象。

接头的几何形状对上述特性都有影响。通常是先围绕后 3 项对几何形状的要求来设计焊接接头的结构形式，然后再根据导电性要求计算接头的尺寸。Howard.H.Manko 认为：满足



导电性要求的接头设计，在机械方面也能满足耐用性和散热性要求。

下面分析常见形式的焊接接头在拉伸和剪切力作用下的情况。在分析问题之前先做如下假设：接头设计能保证纯拉伸或剪切应力均匀分布；钎料填充并润湿了全部横截面积；填充焊缝的钎料未发生溶解强化或其他钎料成分的变化。

在拉伸和剪切两种力的作用下，组装件的强度是所涉及临界面积的函数。若知道最薄弱环节，则可把组装件的接头强度 S_b 用下式表示：

$$S_b = \sigma_b A_b \quad (9.1)$$

式中， S_b 为组装接头强度； A_b 为基体金属的临界面积； σ_b 为基体金属的屈服强度（拉伸应力或剪切应力）。

利用填充钎料本身的强度，可用同样方式表示如下：

$$S_s = \sigma_s A_s = S_j \quad (9.2)$$

式中， S_s 为钎料强度； A_s 为钎料临界面积； σ_s 为钎料的屈服强度； S_j 为焊接接头强度。

如果要求接头强度等于组装件其余部分中最薄弱的强度，则由上述两式可得出：

$$S_b = \sigma_b A_b = \sigma_s A_s = S_j \quad (9.3)$$

如果定义 σ_b/σ_s 为强度系数 β ，则由式 (9.3) 可得出：

$$A_s = \beta A_b \quad (9.4)$$

由此可知，对于强度等于或小于钎料强度的所有基体金属来说，钎料横截面积可等于或小于基体金属的横截面积，大多数情况下有：

$$B > 1 \quad A_s > A_b \quad (9.5)$$

因此，为使强度相等，要求填充钎料的横截面积要高出几个数量级。在 PCBA 组装中，搭接接头是优先采用的接头形式，适用于使接头具有规定的强度和与组装件的最薄弱环节的强度相匹配。在 PCB 上采用的搭接形式，常见的结构又可细分为下述几种。

1. 平板-平板搭接结构

现代电子产品中的 SMC、SMD 元器件在 PCB 焊盘上几乎都采用这种接头结构。根据 PCB 采用的自动化焊接工艺方式（波峰焊或再流焊）的不同，表现的具体结构形式也稍有差别，如图 9.4 所示。

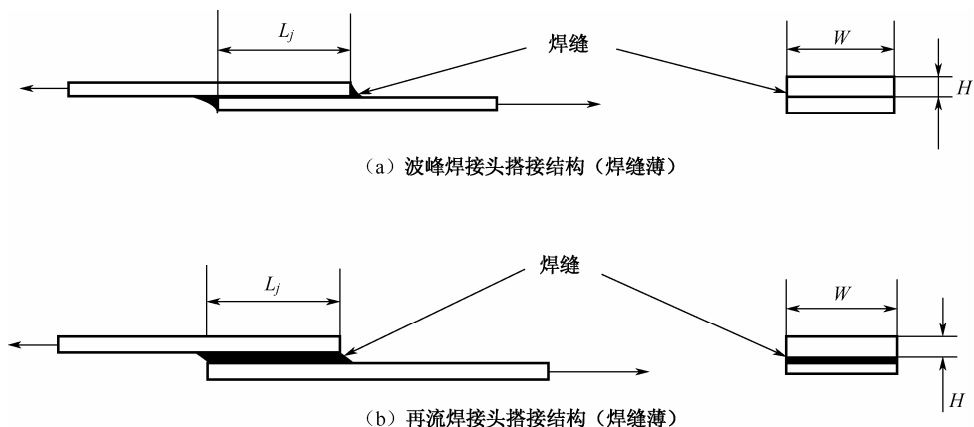


图 9.4 平板-平板接头搭接结构



在剪切应力作用的情况下, 平板-平板的搭接长度 L_j 的计算公式可近似利用式 (9.4) 进行推导:

$$WL_j = \beta WH, \quad L_j = \beta H \quad (9.6)$$

(1) 波峰焊接的接头搭接结构

波峰焊接工艺中的接头结构的几何形状与再流焊接相似, 此时先将 SMC、SMD 元器件的引脚或电极对准焊盘后直接贴合在焊盘金属表面, 并通过胶粘的方式将元器件体固定在 PCB 的焊盘上。波峰焊接时依靠润湿和毛细作用将钎料填充到焊缝处, 因此焊缝一般均很薄。

(2) 再流焊接的接头搭接结构

再流焊接工艺操作中, 焊膏先在 PCB 的焊盘上, 在焊盘上预先形成一定厚度的焊膏层, 然后再将 SMC、SMD 等元器件的引脚或电极对准并贴装在焊膏的上面, 再流焊接后便在 PCB 的铜焊盘表面与元器件引脚或电极的两相对面之间形成了一定厚度的纯钎料层。

2. 圆柱对平面搭接结构

在孔未金属化的单面印制电路的 THT 高可靠性电子设备安装中, 常采用这种加强的搭接安装结构。对于此种结构形式, 要求检查填充钎料的宽度大于还是小于引线的半径 (假定它是最薄弱的环节), 这种接头形式如图 9.5 所示。

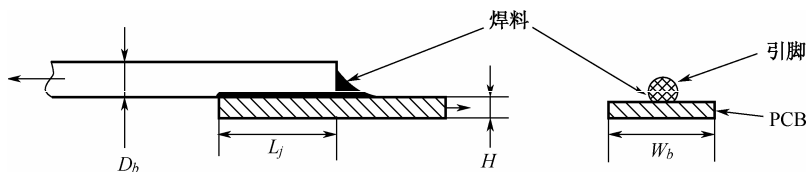


图 9.5 圆柱对平面的搭接接头

由式 (9.4) 可得:

$$D_b L_j = \frac{\pi}{4} \beta D_b^2 \quad L_j = \frac{\pi}{4} \beta D_b \quad (9.7)$$

如果平板是两者中强度较低的零件, 则由式 (9.4) 可得:

$$D_b L_j = \beta W_b H \quad L_j = \beta \frac{W_b H}{D_b} \quad (9.8)$$

3. 线对孔的搭接结构

如图 9.6 所示为波峰焊接中线对孔的典型搭接结构, 这是通孔插装方式主要的接头结构方式, 也是波峰焊接接头中最好的一种形式。

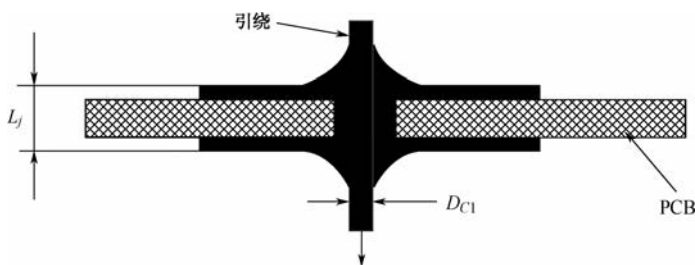


图 9.6 波峰焊接中线对孔的典型搭接结构

9.3.2 焊接接头的几何形状设计与电气特性

1. 接头的电阻

由于钎料的电阻率比 Cu 的电阻率要高，所以相对 Cu 而言，钎料为不良导体。假设用某种方法将长度各为 1cm、横截面积为 1cm² 的 Cu 导线和同样一段 Sn37Pb 钎料导线连接起来，则可用图 9.7 表示的图形标示其电阻。此时可看出，Cu 导线和钎料导线组成的总电阻等于 Cu 线电阻和钎料线电阻之和。如果为了保持整个线路电阻均匀分布，就必须相应增大钎料导线的横截面积，直到钎料导线的电阻等于 Cu 导线的电阻为止。这是因为接入钎料导线部分使电阻增大的主要缺点是能量损耗而使发热。

为了保持能量损耗最小及防止组装件的不必要加热，可利用钎料改变连接部分导体的横截面积，使其电导增大到等于 Cu 导线的电导，以突现两者截流能力的匹配。下面分析横断面垂直于电流方向的情况，如图 9.7 所示。长度无穷小的 Cu 导体元，其电阻为

$$R_c = \rho_c \frac{\Delta L}{A_c} \quad (9.9)$$

式中， R_c 是 Cu 电阻 (Ω)； ρ_c 是 Cu 电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)； A_c 是垂直于电流方向的 Cu 横截面积 (cm^2)； ΔL 是该导体元在电流方向的无穷小长度。

同理，对于钎料导体元，式 (9.9) 同样成立：

$$R_s = \rho_s \frac{\Delta L}{A_s} \quad (9.10)$$

式中， R_s 是钎料电阻 (Ω)； ρ_s 是钎料电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)； A_s 是垂直于电流方向的钎料横截面积 (cm^2)； ΔL 是该导体元在电流方向的无穷小长度。

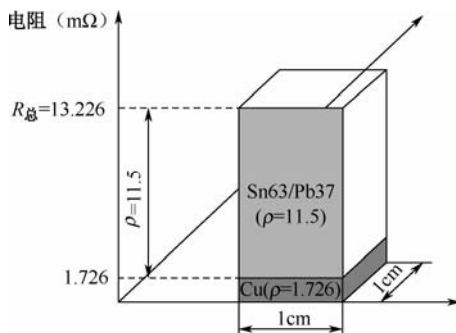


图 9.7 Cu 与 Sn37Pb 相连接导线的电阻分布梯度

现在,可以确定与特定横截面积 Cu 导线的载流能力相匹配而必需的等效钎料横截面积。如前所述,同样长度的 Cu 导线电阻应等于同样长度的钎料导体电阻,由此可得:

$$R_s = R_c, \quad \frac{\rho_s}{\rho_c} = \frac{A_s}{A_c} \tag{9.11}$$

为了分析问题方便,将钎料电阻率与 Cu 电阻率的比值定义为

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho_c} = \frac{A_s}{A_c} \tag{9.12}$$

图 9.8 给出了一些特定导线的 δ 值,然后利用上面的计算公式可计算得出:

$$\delta = \frac{A_s}{A_c} = \frac{L_j D_{C1}}{(\pi/4) D_{C2}^2} = \frac{4 L_j}{\pi D_{C1}} \quad \text{和} \quad L_j = \frac{\pi}{4} \delta D_{C1} \tag{9.13}$$

式中, D_{C1} 是导线的直径。

可以看出,对于圆导线利用搭接接头焊接于平面的情况来说,搭接长度 L_j 等于几何常数 $(\pi/4)$ 和电阻率比值 δ 及导线直径的连乘积。因此,利用同样的方法可计算得出任何所需求形状的焊接连接的公式,具体见表 9.1。

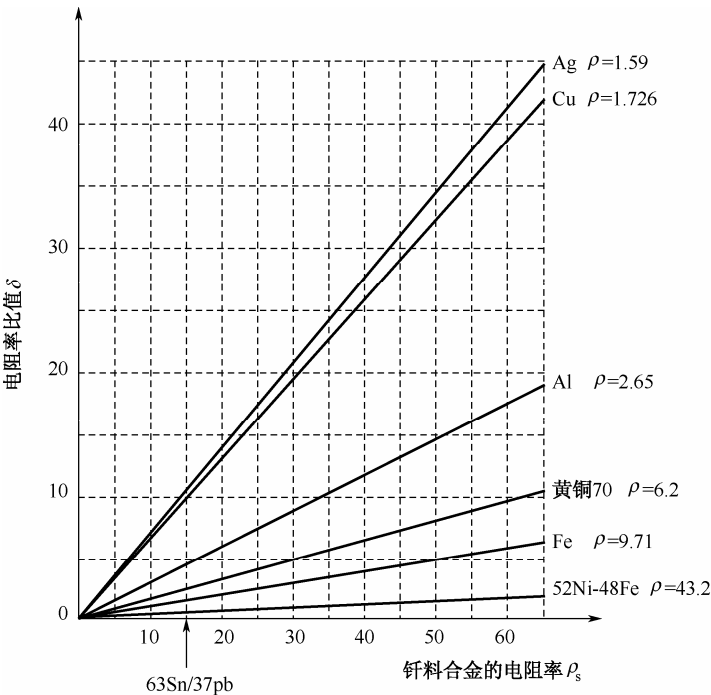
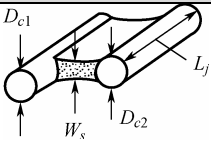


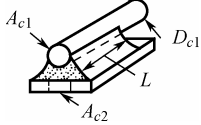
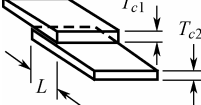
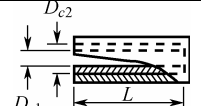
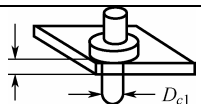
图 9.8 作为钎料电阻率函数的几种基体金属电阻率的比值

表 9.1 PCB 上常见的搭接接头电气设计数据

接头类型	图示	计算控制参数和公式	条件	夹具	电流
圆柱-圆柱 (搭接接头)		$L_j = \frac{\pi}{2} \delta D_{c1}$	$\begin{aligned} \rho_{c1} &\geq \rho_{c2} \\ D_{c1} &\leq D_{c2} \\ W_s &\geq \frac{D_{c1}}{2} \end{aligned}$	用	大



续表

接头类型	图示	计算控制参数和公式	条件	夹具	电流
圆柱-平面 (搭接接头)		$L_j = \frac{\pi}{4} \delta D_{c1}$	$\rho_{c1} \geq \rho_{c2}$ $A_{c1} \leq A_{c2}$	任意	大
平面-平面 (搭接接头)		$L_j = \delta T_{c1}$	$\rho_{c1} \geq \rho_{c2}$ $T_{c1} \leq T_{c2}$ $W_1 = W_2 = W_s$	任意	大
线-杯形端子 (搭接接头)		$L_j = \frac{1}{4} (\delta - 1) D_{c1}$	$\rho_{c1} \geq \rho_{c2}$	不用	大
线-孔 (搭接接头)		$L_j = \frac{1}{4} \delta D_{c1}$	$\rho_{c1} \geq \rho_{c2}$	任意	中等

注: D_{c1} —较细导线的直径; A_{c1} —较细导线的截面积; s —钎料;

T —厚度; W —宽度; L —焊缝的长度;

δ —电阻率比值; ρ —电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)。

如果接入和接出接头的导线不同,则应根据单位长度电阻率最高的导线进行计算。上述计算都是在假定全部电流均通过填充钎料的条件下进行的,即被连接的导线不相互接触,而是通过填充钎料来桥连的。实际情况并非如此,在实际连接中,基体金属导线可能相互接触(即搭接的间隙趋近于零)。由于导线间直接接触而使部分甚至大部分电流通过该接触面从一个导体流到另一导体,所以填充钎料可能不通过全部负荷电流,此时的工况就要好得多。然而进行具体的工程设计计算时,仍然要按不相互接触的最坏工况来考虑。

上述采用的在使整个回路保持均匀电压梯度的条件下求出填充钎料参数的分析计算方法,可用于其他所有焊接接头的计算中。每种情况下均存在一个可能变化并因而改变载流能力的控制因素(见表 9.1)。改变这些控制因素,即可使接头的载流能力与接入或接出接头的导线载流能力相同。由于相互影响的变量(基体金属的可焊性、助焊剂、钎料合金成分、焊接方法、焊接时间、焊接温度等)太多,因此计算后应增加 50%~100%的安全系数。

2. 合金层的电阻

焊接接头电阻的增加,不仅受基体材料和钎料电阻率的影响,而且还受焊接接头金属学构成的影响,其中最具影响力的是焊接界面形成的合金层。就 Sn 基钎料和 Cu 基材的焊接界面形成的 Cu_6Sn_5 (η 相)、 Cu_3Sn (ε 相)合金层来说,其电阻率与 SnPb 钎料的电阻率的比较如图 9.9 所示。

由图可知, Cu_3Sn 和 SnPb 钎料的电导率很接近,而 Cu_6Sn_5 的电导率与 SnPb 钎料的电导率却差异很大。应该充分关注焊接接头界面形成的合金层电阻的影响,特别是在微焊接情况下,这是一个不可忽视的问题。因此,在焊接中必须注意避免合金层的过度生长。

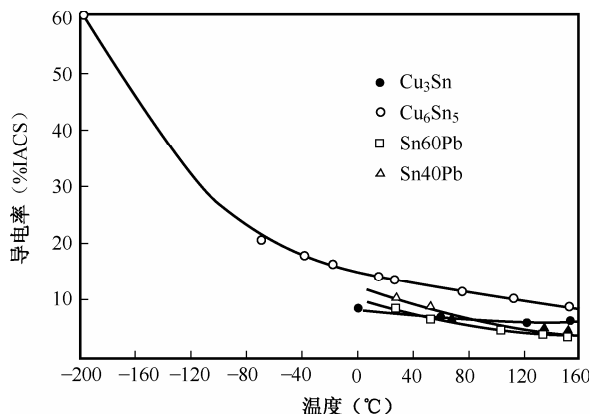


图 9.9 Cu-Sn 系金属间化合物的电导率

3. 接头的热电势

在焊接接头的附近存在温度梯度的场合下，基体金属和钎料之间会因为塞贝克效应而产生热电势。在把 Cu 系母材用 Sn-Pb 系钎料接合的场合下，每 10℃ 的温度差约产生 30μV 的热电势。因此，对精密测量设备而言，焊接接头将成为产生测量误差的根源。

9.4 焊接接头机械强度的影响因素

9.4.1 钎料量对接头剪切强度的影响

美国学者 Nightingale 和 Hudson 在致力于证明施用钎料量是影响焊点剪切强度的重要因素的研究中得出了如下结论：在实际中，因为施用过多的钎料通常掩盖了虚焊或部分虚焊的焊点，所以必须避免施用过多的钎料，可以说，施用多于适当填充焊缝所需的钎料没有任何益处。

表 9.2 列出的数据明确表明焊点中的多余钎料不能提高焊点强度。润湿情况和焊点的可检查性密切相关，在有限的表面上施用过多的钎料会掩盖实际的可检查区域，从而使人们得出错误的结论，这进一步说明要防止焊点的钎料过多。因此，为便于质量控制而要求的薄填充钎料的可检查的焊缝，对于高可靠性焊点来说尤为必要。

表 9.2 施用钎料量对焊点剪切强度的影响

被焊材料	焊接温度 (°C)	焊缝厚度 (mm)	所用钎料量 (g)	抗剪强度 (kg/mm ²)
Cu	300	0.076	24.8	3.656
			39.7	3.403
			62.2	3.009
			79.8	3.586

注：表中所用钎料为 Sn55Pb，助焊剂为 ZnCl。



9.4.2 与熔化钎料接触时间对接头剪切强度的影响

焊接连接的成功主要取决于润湿程度，而合金化本身只起辅助作用。Nightingale 和 Hudson 在论证与熔化钎料接触的时间对焊点剪切强度影响的研究结论中指出：当熔化钎料的接触时间在经验限定的范围内时，该接触时间对焊接焊点强度的影响较小，并给出了表 9.3 所示的结果。

表 9.3 与熔化钎料接触的时间对焊点强度的影响

接触时间 (s)	剪切强度 ((kg/mm ²)		
	铜	黄铜	软铜
5	3.825	0.914	2.334
10	1.983	2.658	1.926
15	3.375	2.841	2.348
20	2.925	1.730	3.009
25		1.884	
30	3.375	1.842	2.095
40	2.011		

注：钎料为 Sn55Pb；焊缝厚度为 0.0762mm；焊接温度为 300℃；助焊剂为 ZnCl。

9.4.3 焊接温度对接头剪切强度的影响

Howard • H • Manko 的研究结论认为：在最佳焊接条件下，焊点的剪切强度取决于焊接温度。而在特定温度下，选用的助焊剂种类也是一个非常重要的影响因素。并非所有的助焊剂在所有的温度下均能良好地润湿和除去锈膜，对每一种具体的助焊剂来说，均存在一个最佳温度。图 9.10 所示为用两种钎料 Sn44Pb 和 Sn55Pb 焊接铜、黄铜、低碳钢三种基体金属时接头强度随焊接温度的变化曲线。从图中可看出，预镀了锡的试样的强度要高得多。

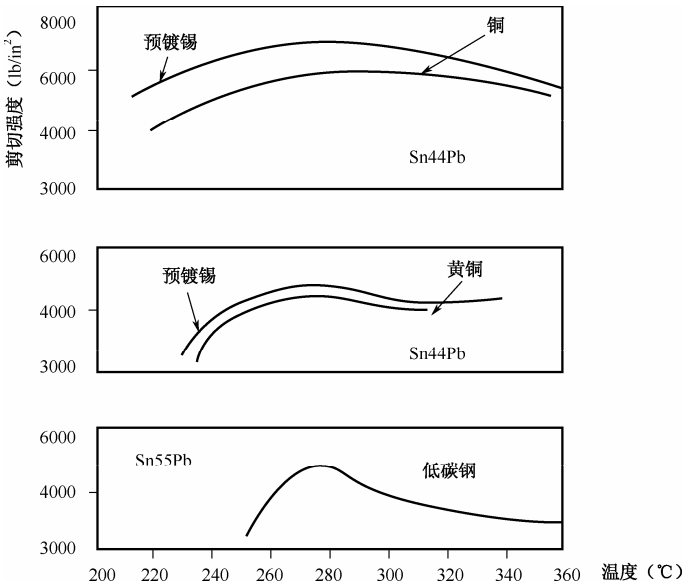


图 9.10 焊点剪切强度随焊接温度的变化



9.4.4 接头厚度/间隙对接头剪切强度的影响

接头强度是被焊表面之间间隙的函数，对应最大接头强度的最佳间隙约为 0.076mm。采用该间隙时，助焊剂和钎料很容易流入接头，以达到均匀的润湿。当间隙较窄时，容易把空气和助焊剂截留在接头中，从而导致润湿面积减小，并因此而降低接头强度。当间隙较大时，则有助于润湿的毛细管作用力较小，而且较厚的焊缝机械强度比较低，并且通常接近于钎料合金本身的强度，因此降低了完全溶解强化的可能性。在焊接中，通常一定量的基体金属溶解到钎料中，可使其强度增加。图 9.11 所示为接头厚度对 Sn40Pb 钎料接头剪切强度的影响。

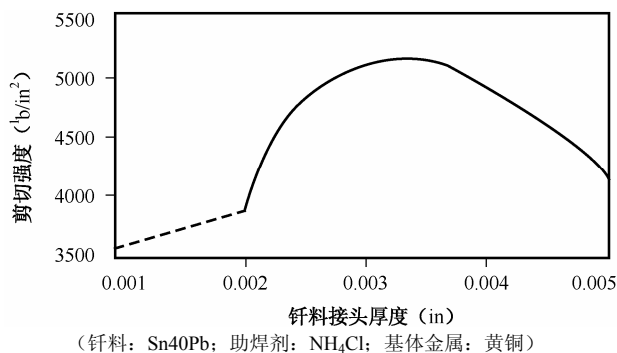


图 9.11 连接接头剪切强度随接头厚度的变化

Nightingale 和 Hudson 通过试验研究，归纳出了可用于表示接头厚度和焊接温度之间关系的公式，并得出了对应最大接头强度下的接头厚度-焊接温度的平滑曲线，如图 9.12 所示。该曲线极近似于双曲线，因而可得出如下的实用公式：

$$(T-t)S = K \quad (9.14)$$

式中， T 是焊接温度； t 是 SnPb 钎料的固相线温度； S 是接头厚度； K 是 0.34（由经验求出的常数）。

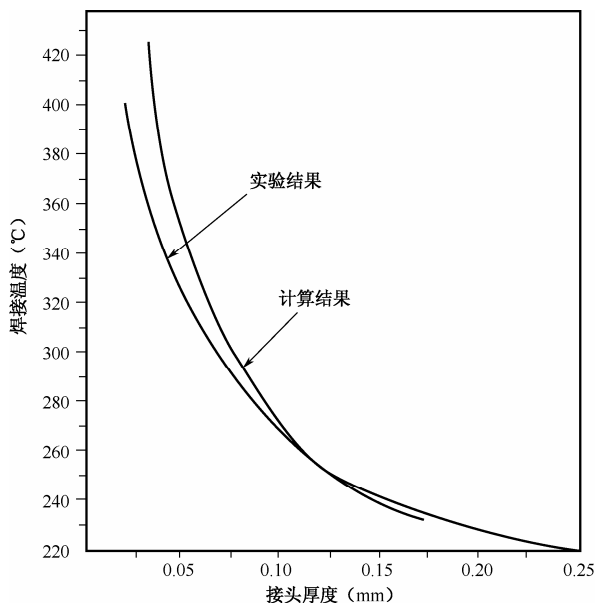


图 9.12 接头强度最高条件下的焊接温度与接头厚度的关系



图 9.12 中所示的理论曲线和实验极为相似,以至于可以把它看成接头最高强度、接头厚度和焊接温度三者的关系定律。对于 SnPb 低共熔成分的钎料来说, K 值可能是相同的,而且与被焊材料无关,但可能与所采用的助焊剂有关。低温焊接接头和间隙较小的接头几乎总会有助焊剂杂质。显然,在较高焊接温度下可采用厚度较小的接头,因为高温下钎料的流动性好,而在较低温度下较黏的钎料不能较好地填充和渗入所要填充的间隙。当温度超出了图中所示范围时,则不能再使用此曲线,因为在较低的温度下钎料不易润湿基体金属。而当温度过高时,由于氧化和助焊剂等因素的干扰,也可能得出错误的结论。

9.4.5 接头强度随钎料合金成分和基体金属的变化

剪切和拉伸强度所代表的接头强度取决于被焊的基体金属,因为基体金属具有溶解强化元素的作用。在图 9.13 所示使用范围内, Hudson 和 Nightingale 证明了基体金属对钎料接头的影响。该图表明:当溶解强化效应起作用时,它成比例地以纯钎料体强度曲线同样的形式影响钎料强度。

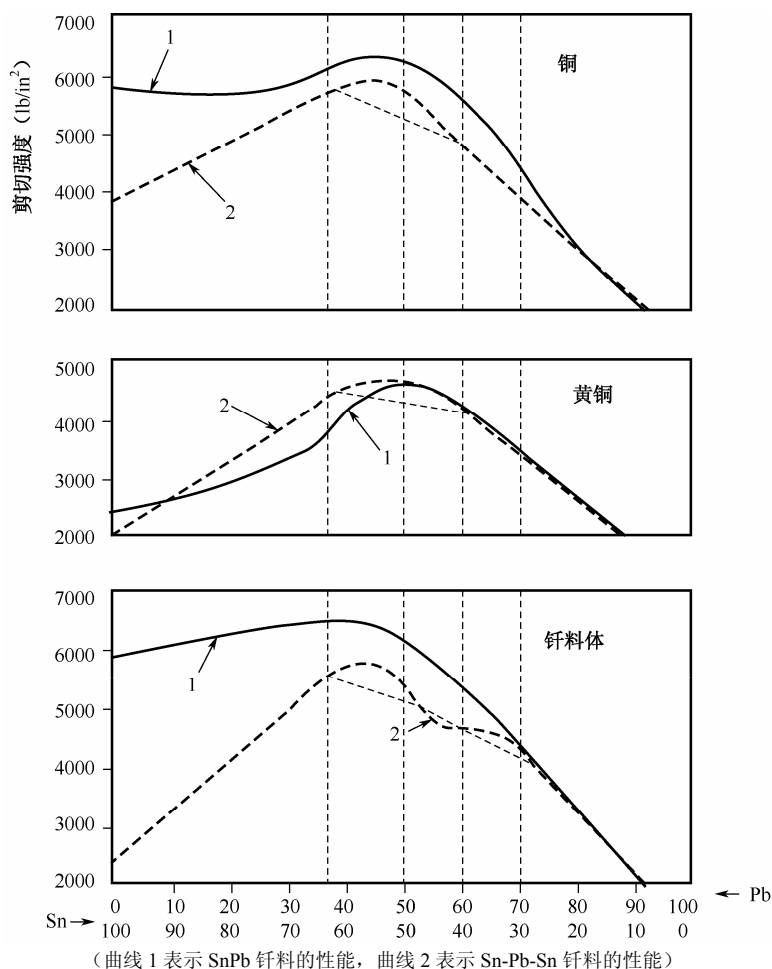


图 9.13 焊接接头强度随钎料合金成分的变化



9.4.6 接头的蠕变强度

不同钎料成分的焊接接头抗蠕变强度与温度的关系如图 9.14 所示。在高温下抗蠕变强度显著变小。如果在 Sn-Pb 钎料中添加少量的 Cu、Sb 元素,可有效改善其抗蠕变能力。

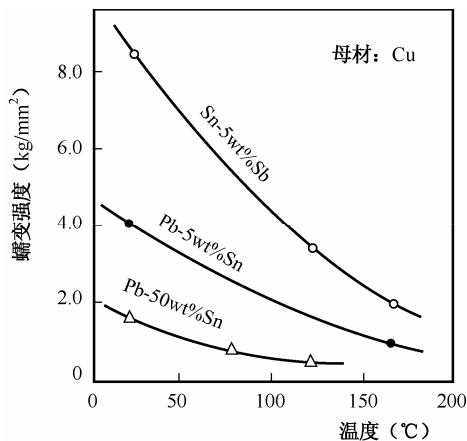
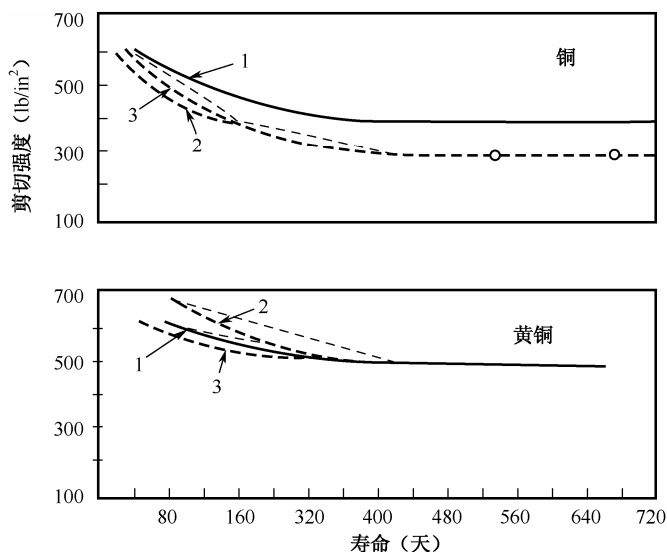


图 9.14 焊接接头的抗蠕变强度与温度的关系

Baker 研究比较了应力-寿命曲线,画出了应力和该应力作用下接头至断裂所经历时间的关系曲线,如图 9.15 和图 9.16 所示。



1—Sn40-Pb57.8-Sb2.0-Cu0.09; 2—Sn44.3-Pb55.68-Cu0.009; 3—Sn44.3-Pb55.68-Cu0.093

图 9.15 剪切应力条件下单搭接接头的耐久性(室温下)

从以上分析中可知,对于焊接铜和黄铜来说,纯钎料合金和不太纯的钎料合金之间的差别显著减小。这是因为从基体金属溶解下来的铜扩散到钎料晶格中,并将其本身的性能赋予了钎料。从黄铜上溶解下来的锌元素对接头性能的改善作用甚至比铜还强,因此黄铜的焊接强度比较高,仅从此点看,在 Sn-Pb 钎料中添加锌元素是有益的,但锌元素对钎料的其他性能是非常有害的。

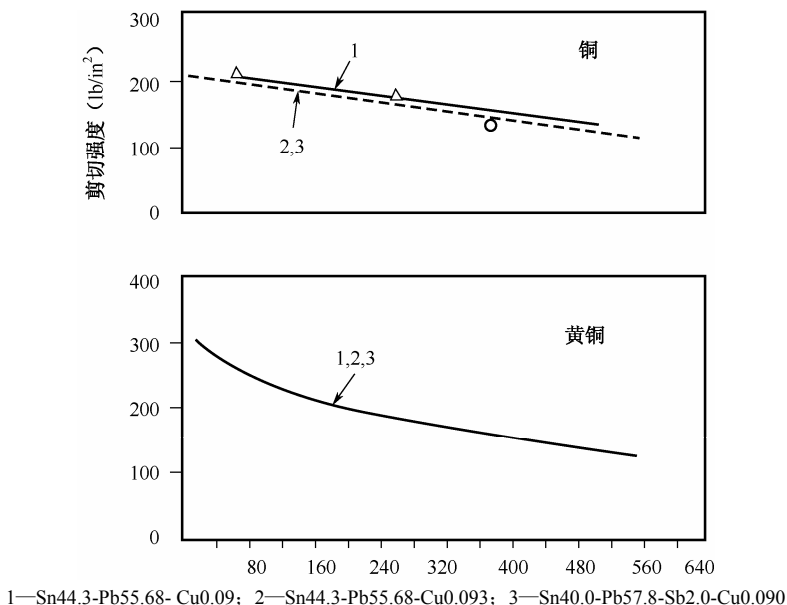


图 9.16 剪切应力条件下单搭接接头的耐久性（80℃）

9.5 焊接接头三要素与焊点可靠性

9.5.1 焊点可靠性的影响因素

焊接接头系统主要由三要素构成，即基体金属、钎料合金及助焊剂。为了获得良好的焊接连接，这三种材料必须完全匹配。

1. 基体金属

设计焊接组装件时，要考虑与焊接有关的基体金属特性，见表 9.4，主要考虑以下几个方面。

① 腐蚀的可能性：电极电位是一个重要因素，如果存在电离液体，基体金属间或基体金属与钎料之间电位差高的场合会产生腐蚀现象。

② 在小型和精密组装中，要关注选用的基体材料和钎料的热膨胀系数的匹配问题，以确保组装件在温度变化的情况下应用时不产生应力和尺寸变化。

③ 因受热和冷却而产生的损坏现象称为热疲劳。热胀冷缩是产生热疲劳应力的主要原因，不管这些应力发生在哪个部位，都将使焊缝中的钎料连续位移。如果钎料是可延展的，而且润湿良好，虽然焊缝表面应力集中的部位有时会产生结霜现象，但焊接接头不会损坏。

④ 表中的可焊性是指金属表面的可焊性，不包括为改善可焊性而具体采取的表面处理措施。



表 9.4 常用的基体金属特性（以电化序大小排序）

金属	电极电位 (V)	可焊性	电阻率 ($\mu\text{m}\cdot\text{cm}$)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ($\text{g}\cdot\text{cmg}\cdot\text{cm}^3$)	线膨胀系数 ($\text{in}/^{\circ}\text{F}$)	拉伸弹性模数 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \times 10^5$)	布氏 硬度
锌	0.76	正常	5.916 (20 $^{\circ}\text{C}$)	419.4	7.14	0.000018	84.4	31
铁	0.44	正常	9.71 (20 $^{\circ}\text{C}$)	1535	7.87	0.0000066	200.4	60
镍	0.25	正常	6.84 (20 $^{\circ}\text{C}$)	1452	8.9	0.0000076	211.0	110
锡	0.14	正常	11.5 (20 $^{\circ}\text{C}$)	232	7.30	0.000013	42.8	5.2
铅	0.13	正常	20.65 (20 $^{\circ}\text{C}$)	327	11.36	0.000016	18.3	3.9
铈	-0.10	正常	39.0 (0 $^{\circ}\text{C}$)	630	6.62	0.0000063	79.5	42
铋	-0.20	正常	119 (0 $^{\circ}\text{C}$)	271	9.80	0.00000747	32.3	4.7
铜	-0.34	正常	1.726 (23 $^{\circ}\text{C}$)	1083	8.94	0.0000091	112.5	42
银	-0.80	正常	1.59 (20 $^{\circ}\text{C}$)	961	10.5	0.0000105	77.3	95
钯	-0.82	正常	10.8 (20 $^{\circ}\text{C}$)	1554	12.0	0.0000066	119.5	35
铂	-0.86	正常	9.83 (0 $^{\circ}\text{C}$)	1773	21.45	0.0000043	147.7	37
金	-1.68	正常	2.19 (0 $^{\circ}\text{C}$)	1063	19.3	0.000008	84.4	28

2. 钎料合金

理想的焊接用钎料，一般为低共熔和糊状区最窄的合金。为使熔化的合金具有流动性和良好的润湿性，焊接温度应高于液相线温度 15.5~71 $^{\circ}\text{C}$ 。焊接温度不是一个固定数据，因为其本身也是时间的函数，且跟焊接方法有关，如再流焊接中允许焊接时间长，就可选用较低的焊接温度。

选择焊接温度时一般要考虑最高温度和最低温度。温度上限主要取决于组装件的热变形，对 PCB 这类有机材料来说更是如此。减小热变形的办法，通常是整个组装件缓慢预热，避免因热梯度过大而引起热冲击。温度下限主要取决于焊接接头的工作温度。随着钎料合金温度以渐近线的方式接近熔点，其强度降低量增加，最终不可能再靠焊料合金把被焊元器件固定在一起了。当利用易熔合金作为钎料时，温度限制是非常重要的，归纳的经验公式为

$$\text{实用的上限温度} = \frac{T_{\text{sol}} - T_{\text{room}}}{1.5} + T_{\text{room}} \quad (9.15)$$

式中， T_{sol} 是固相线温度； T_{room} 是室温（20 $^{\circ}\text{C}$ ）。

因此，在已知的高环境温度下，选用的钎料必须与其相匹配，以保证焊接接头在高温下仍具有足够的强度把被焊的零件连接在一起。

3. 助焊剂

电子组装焊接用助焊剂的选用可参考表 9.5，主要考虑以下几个方面。

- ① 易焊合金：可用松香基有机助焊剂及活性较强的助焊剂焊接。
- ② 难焊合金：在不采用表面预处理措施的情况下，通常不能焊接。
- ③ 无机助焊剂因活性太强和腐蚀的危险性太大，不宜使用。
- ④ 当表面无严重的锈膜或类似的污染时，在有利条件下使用水白松香助焊剂，而通常条件下使用活化松香或非松香有机材料助焊剂。



表 9.5 电子组装焊接用助焊剂的选用

金属表面		无机助焊剂	非松香 有机助焊剂	松香有机助焊剂	
分类	名称			水白松香	活化松香
易焊表面	黄铜	常用	常用	有利情况下使用	常用
	青铜	常用	常用		有利情况下使用
	铜		常用	有利情况下使用	常用
	金		常用	有利情况下使用	常用
	铅	常用	常用	有利情况下使用	常用
	镍	常用	常用		有利情况下使用
	钯		常用	有利情况下使用	常用
	铂		常用	有利情况下使用	常用
	银		常用	有利情况下使用	常用
	锡		常用	有利情况下使用	常用
	HASL: Sn-Pb		常用	有利情况下使用	常用
	镀: Sn-Pb		常用	有利情况下使用	常用
	镀: Sn-Ni		常用	有利情况下使用	常用
	镀: Sn-Zi		常用	有利情况下使用	常用
难焊表面	铜铍合金	常用	有利情况下使用		
	铜合金	常用	有利情况下使用		
	铁镍钴合金	常用	有利情况下使用		
	蒙乃尔高强度合金	有利情况下使用			
	镀锌钢表面	常用	有利情况下使用		
	钢	常用	有利情况下使用		

9.5.2 可焊性对焊点可靠性的影响

焊接接头系统的三种材料要想完全匹配，形成良好的焊点结构，可焊性至关重要。可焊性是指在规定的时 间、温度和环境条件（助焊剂）下基体金属被熔化钎料润湿的能力。而润湿作用的广义定义为：在基材上形成一层相对均匀、平滑、无裂缝黏附着的钎料薄膜。

评价可焊性的内涵包含下述三个方面的约定。

- ① 熔化钎料对基体金属的润湿性。
- ② 钎料和基体金属的接合性。
- ③ 接合部的可靠性。

上述三个约定中，熔化钎料对基体金属的润湿性是表述可焊性的最重要的一项内容，一般来说润湿性好则接合性也好，然而润湿性好却不一定说明焊接接合部的可靠性高。以 Sn 基钎料焊接 Au 系基体金属就是一个典型例子。由此可以定义：容易润湿基体金属，而且还能获得机械强度好的接合部，才是可焊性好的钎料或可焊性好的基体金属。

可焊性和焊接接合部的可靠性之间有着密切的关系。通常情况下，可焊性好的材料，其焊接接合部的可靠性也高。然而高可靠性的接头是通过可焊性好的基体金属、钎料、助焊剂及焊接工艺参数等综合要素来获得的。正是由于可焊性受基体金属、钎料、助焊剂、焊接条



件（温度、时间）等参数的综合影响，所以只有对这些影响参数一一做出定量评估，才有可能对整体的可靠性做出客观的评价。

图 9.17 所示是焊接接头三要素及环境和可焊性相互关系的可靠性平衡图，图中列出了通常影响焊接操作的 5 个变量：温度、时间、钎料、助焊剂和基体金属可焊性。其中，比较恒定的量是时间、温度、钎料（假定没有被污染），在应用中可以利用助焊剂的活性综合控制这些变量。而可焊性是其中唯一不可控的参数，用可焊性表示的表面质量取决于供应商、存储、传递和前面所讨论的其他变量。从该平衡图中可以看出所采用的每种助焊剂要求的最低可焊性水平，如果可焊性水平低于助焊剂活性允许的最低限度，则焊接效果肯定不好。

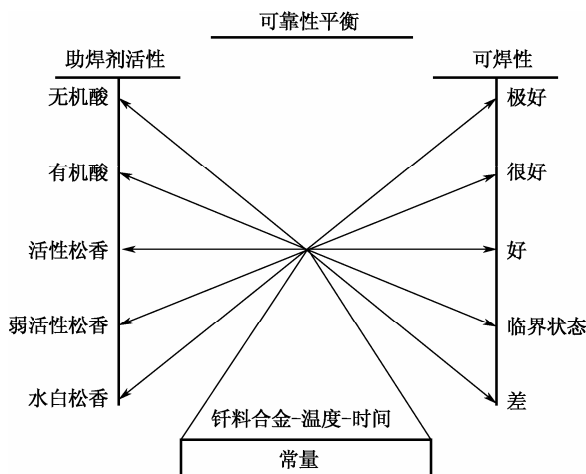


图 9.17 焊接接头三要素及环境和可焊性相互关系的可靠性平衡图

目前采用的浸入式可焊性实验方法，完全是从使用观点制定的，它不能揭示产生焊接问题的原因。为了防止在以后的生产中再出现可焊性问题，从实验观点来看，元器件用户应把加速老化纳入可焊性实验方案中，因为容易出问题的元器件往往是那些验收时可焊性就处于临界状态的元器件。因此，厂家不仅必须预测元器件未来的可焊性，还必须能够分析出质量不好的原因，以便校正和预防元器件未来的可焊性变差。利用基于扫描电子显微镜的分析手段，可以解释这些表面可焊性差的原因。

9.5.3 可焊性的存储期试验及其方法

1. 存储期对可焊性的影响

元器件在长期存放过程中，各种镀层金属表面的可焊性均会恶化，并随着存储期的增加而增加，如表 9.6 和图 9.18 所示。产生这种现象的原因主要包括两个方面：金属表面接触空气中的氧、水分，在个别场合还会出现 SO_2 气体、盐雾气之类的腐蚀性气体，生成氧化膜和氯化膜，使金属层的可焊性不断劣化；上层镀层与基体金属之间，两种金属原子的扩散形成的金属间化合物，使镀层厚度变薄，从而使表面可焊性下降。例如，将镀 Sn 导线暴露在 155°C 温度下进行加速老化，持续 16h 后金属间化合物厚度将增至 $2\mu\text{m}$ ，这对于镀层较薄或不均匀的镀 Sn 引脚来说，会完全或部分消耗 Sn 镀层，影响表面可焊性。因此，国际锡金属



研究协会提出在镀 Sn 层和基体金属间引进一层阻挡层（如 Ni 层）以延缓金属间化合物的生长速度。当然，在室温下也会形成界面合金层，但过程进行地非常缓慢，其厚度不会超过 1 μm ，因此长期存放后可焊性不会明显变化。

表 9.6 不同镀层材料可焊性表面的退化

镀层金属和结构	新鲜材料	24小时蒸汽	21天湿热	6个月正常储存
镀Sn				
镀Sn-Pb合金				
热滚Sn-Pb合金				
化学镀Sn（A）				
化学镀Sn（B）				
镀Au				
化学镀Au				
镀Ag+薄Au				
镀Sn-Ni+薄Au				
镀Sn-Ni+合金				
镀Sn-Ni+薄Sn				
未涂覆的Cu				

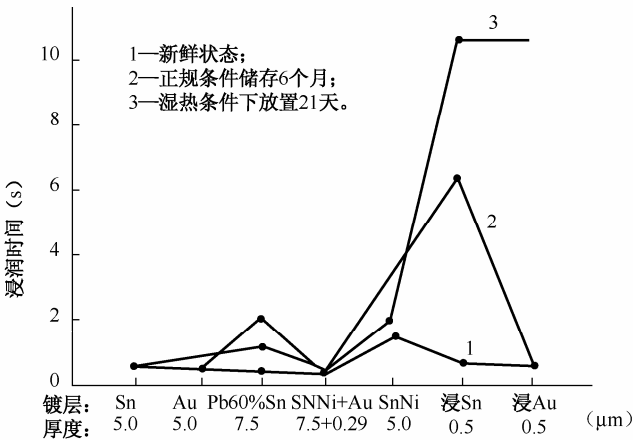


图 9.18 不同可焊性镀层在不同环境条件下存储的退化

2. 加速老化处理试验

为了使 PCB 及元器件应用者通过加速老化的方法对储存后的可焊性进行检查，或者说只有在老化处理后仍保持良好可焊性的 PCB 焊盘及元器件引脚，才能在室温下长时间储存后可焊性不会有明显下降，人们想出了各种加速老化处理办法，作为鉴定保管期间可焊性变化的参考。



(1) 国际电工委员会推荐的老化方法

国际电工委员会推荐了集中老化方法,包括 1h 和 4h 的蒸汽老化,10 天的恒定湿热老化及 155℃、16h 的高温老化。蒸汽老化和湿热老化主要影响表层氧化和腐蚀,而高温老化除了影响表层老化外,还大大加速了合金层的形成,对可焊性的影响最为严重。对于 1h 的蒸汽老化,按照 MIL-STD-202F 中试验方法 208D 的规定,至少相当于具有各种退化效应的综合储存条件下 6 个月的自然老化量。155℃、16h 的高温老化对于评定长期储存的导线端头的可焊性不太适合。若一定要在 155℃下做模拟试验,只要加速老化 4h 便足够了。

(2) 日本土肥信康等人的研究试验结论

与加热(150℃、1h)处理、亚硫酸气体(25℃、90%RH、SO₂浓度为 2000ppm、5h)和盐雾(35℃、5%NaCl 水溶液喷雾、5h)处理方法相比,蒸汽老化(90%RH、100℃、3~24h)是一种条件极为苛刻的加速老化处理方法。它能模拟所有镀层可焊性恶化的因素,而且使用的设备相对简单、重复性好,被认为是最适宜的加速老化处理方法。它同时配以控制精度良好的可焊性试验方法,是电子工业领域对各类镀层长期保管可焊性测试的最优选择。

(3) 国内电子业界的试验建议

国内工业部门也有人通过试验后认为,镀层可焊性在自然存储后的变化可通过下面两项等效加速试验来进行模拟。

一是蒸汽加速老化试验,即把样品悬挂在沸腾的蒸馏水面上,距离水面为 $25 \pm 5\text{mm}$,老化时间不小于 2h。据资料显示,此条件下 2h 的可焊性劣化程度与无工业气体的储室中无包装自然存储 25 个月后的可焊性是等效的。

二是稳态湿热加速老化试验,即把样品放入潮湿箱中,温度为 40℃,相对湿度为 $93 \pm 3\%\text{RH}$,老化时间根据使用要求确定。据资料显示,此条件下 10 天的可焊性劣化程度与无工业气体的储室中无包装自然存储 25 个月后的可焊性是等效的。

3. 润湿性试验方法

由可焊性内涵可知,熔融钎料对基体金属的润湿是重要的工艺性指标,因此在工程上需要对其进行评定,尤其是希望能进行定量的评定。但目前还无法从理论上完全精确确定实际工程体系的润湿性优劣,其原因之一是缺乏各种材料匹配之间的接触角数据;此外,实际焊接过程中的条件比较复杂,影响因素众多也是原因之一。因此,一般只能借助于试验方法来评定其润湿性。常用的测定方法包括润湿平衡测试法、接触角测量法(固滴法,也叫贝克曼法)、铺展面积测量法、铺展系数与润湿指数测量法、填缝长度的测量法、复合板流动系数的测定(单板爬升法)、润湿时间的测定(焊球法)、一端浸渍法。其中,铺展面积测量法已被确定为国家标准(GB 11364—89),铺展系数与润湿指数测量法已被 JIS 规定,一端浸渍法已被 JIS 和 MIL 作为标准规定下来。



9.6 焊点可靠性评估方法

焊点可靠性评估主要包括三方面的内容：对组装后的电子产品进行热负荷试验（温度冲击或温度循环试验）；按照疲劳寿命试验条件对电子产品焊点进行机械应力测试；使用模型进行寿命评估。目前比较著名的模型有低循环疲劳的 Coffin-Manson 模型、修正 Coffin-Manson 模型（一般在考虑平均温度与频率的影响时使用）和 Coffin-Manson 模型（在考虑材料的温度特性及蠕变关系时采用）。

评估焊点可靠性的测试方法主要有外观检查、X-ray 检查、金相切片分析、强度（如抗拉、剪切）检测、疲劳寿命检测、高温高湿检测、跌落实验、随机振动检测、可靠性检测方法等。

1. 外观检查

外观检查主要包括人工检查和自动光学检查（AOI），主要是从外观上看焊点形态是否完好，应符合 IPC-610 的要求。

2. X-ray 检查

X-ray 检查可以进一步检查出焊点中的虚焊及内部孔洞大小和位置。同时，X-ray 检查可用来监控组装工艺是否规范，通过产品首先确认后再批量生产是非常有必要的。当遇到焊点质量问题时可以首选 X-ray 检查，它可对焊点结构做完整性分析。X-ray 检查的最大好处是它是无损性检查并且检查速度快。

3. 金相切片分析

金相分析是金属材料试验研究的重要手段之一，在焊点可靠性分析中，常取焊点剖面的金相组织进行观察分析，因此称为金相切片分析。金相切片分析是一种破坏性检查，样品制作周期长、费用高，常用于焊点故障后分析，但它具有直观、以事实说话的优点。

金相切片分析的关键是制作样品，现以光固化金相切片制作工艺为例，包括如下步骤：首先取样，以检测 BGA 为例，即将要测试的 BGA 通过取样机取样，并放置到专用模具或者夹具中，然后将光固化树脂注入模具中并暴露在紫外光下使其固化，这样树脂与试样固化为一体，得到树脂试样块，最后将树脂试样块打磨、抛光，使试样的横断面裸露从而得到金相切片，直至找到有故障的部位。

对于普通裂纹分析，只要通过金相显微镜观察、计算机记录即可；若用于焊点金属间化合物（IMC）评估，则需借助电子显微镜（SEM）及能谱分析仪（EDS）观察。

4. 自动焊点可靠性检测技术

自动焊点可靠性检测技术是利用光热法逐点检测电路板焊点质量的一种先进技术，具有检测精度高、可靠性好，检测时不需接触或破坏被测焊点等特点。检测时对印制电路板的焊



点逐点注入确定的激光能量，同时用红外探测器监测焊点在受到激光照射后产生的热辐射，由于热辐射的特性与焊点的质量状况有关，故可据此判定焊点的质量好坏。该技术特别适用于可靠性要求高、批量小的产品检测。

5. 进行与温度相关的疲劳测试

焊点可靠性测试主要是针对 PCBA 组件热膨胀系数不同进行的与温度相关的疲劳测试，包括等温机械疲劳测试、热疲劳测试。此类测试包括板级测试和焊点级测试，板级测试包括高低温冲击法、高温老化法和跌落试验等，焊点级测试包括焊球高速冲击试验，即高速冲击和拉伸等。

此外，评估焊点可靠性的方法还有振动试验、弯曲试验、IC 引脚拉力测试等，随着科技进步还将会有更多的方法用于焊点可靠性的试验。

在评估焊点可靠性时可以进行多种测试，但最重要的一点是选择关联性最强的测试方法，并且针对一个具体的方法，明确地确定测试参数，如在进行温度循环测试时如何选择影响最大的参数范围。有了这些测试结果并不等于完成了所有步骤，这只是得出结论的第一步，最重要的一步是综合测试结果，分析数据和现象。

思 考 题

1. 简述理想焊点质量模型。
2. 简述常见焊接接头搭接形式及特点。
3. 简述焊接接头强度影响因素。
4. 简述焊接接头可靠性影响因素。
5. 简述焊点可靠性评估的主要方法。

参考文献

- [1] 余国兴. 现代电子装联工艺基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [2] 方洪渊, 冯吉才. 材料连接过程中的界面行为[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 樊融融. 现代电子装联无铅焊接技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [5] 樊融融. 现代电子装联再流焊接技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [6] 樊融融. 现代电子装联波峰焊接技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [7] 樊融融. 现代电子装联工艺装备概论[M]. 深圳: 中兴通讯电子制造职业学院, 2015.
- [8] 冯力, 朱敏波. 现代电子装联质量管理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [9] 史建卫, 王建明, 杜彬, 等. 电子组装中元器件的选择与应用[J]. 电子工艺技术, 2014,1 (35-1):59-62.
- [10] 史建卫, 檀正东, 周璇, 等. 手工软钎焊工艺技术[J]. 电子工艺技术, 2014,9 (35-5):308-310.
- [11] 史建卫, 檀正东, 周璇, 等. 手工软钎焊工艺技术[J]. 电子工艺技术, 2014,11 (35-6):368-370.
- [12] 史建卫, 檀正东, 周璇, 等. 手工软钎焊工艺技术[J]. 电子工艺技术, 2015,1 (36-1):59-62.
- [13] 韩彬, 史建卫, 檀正东, 等. 选择性波峰焊技术在 SMT 中的应用[J]. 电子工业专用设备, 2014,8 (234):35-41.
- [14] 韩彬, 檀正东, 周璇, 等. 激光软钎焊技术在 SMT 领域内的现状与展望[J]. 电子工业专用设备, 2014,1 (227):1-7.
- [15] 杜彬, 史建卫, 等. 电子组装中焊接设备工艺调试步骤与技巧[J]. 电子工业专用设备, 2013,11 (225):33-41.
- [16] 杜彬, 史建卫, 王玲, 等. 无铅再流焊设备配置工艺性评估[J]. 电子工艺技术, 2013,11 (34-6):337-366.
- [17] 史建卫. 无铅化 PCB 表面材料及工艺特点[J]. 电子工艺技术, 2011,9 (32-5):306-312.
- [18] 史建卫, 宋耀宗. 回流焊工艺中常见缺陷及其防止措施[J]. 电子工艺技术, 2011,1 (32-1):58-61.
- [19] 赵文军, 史建卫, 等. 无铅元器件特点及质量评估方法[J]. 电子工业专用设备, 2010,9 (188):23-31.
- [20] 许愿, 史建卫, 杨冀丰, 等. 电子组装中无铅焊膏的选择[J]. 电子工艺技术, 2009,9 (30-5):270-273.
- [21] 史建卫, 许愿等. 电子组装中助焊剂的选择[J]. 电子工艺技术, 2009,5 (30-3):181-184.
- [22] 史建卫, 许愿, 等. 电子组装中助焊剂的选择[J]. 电子工艺技术, 2009,7 (30-4):242-246.
- [23] 史建卫, 韩忠军, 等. 电子组装中焊接设备的选择[J]. 电子工艺技术, 2009,1 (30-1):56-59.
- [24] 史建卫, 韩忠军, 等. 电子组装中焊接设备的选择[J]. 电子工艺技术, 2009,3 (30-2):119-112.
- [25] 王修利, 史建卫, 等. 通孔再流焊接技术[J]. 电子工业装用设备, 2007,5 (148):34-39.
- [26] 史建卫, 梁永君, 等. 再流焊焊点可靠性自动管理系统[J]. 电子工艺技术, 2007,3 (28-2):78-83.
- [27] 史建卫, 何鹏, 等. 焊膏工艺性要求及性能检测方法[J]. 电子工业专用设备, 2004,12 (119):19-25.
- [28] 张文禹. Cu/Sn3.5Ag 界面化合物 Cu₆Sn 形态演变规律研究[D]. 深圳研究生院, 哈尔滨工业大学工程硕士学位论文, 2010.6.
- [29] 贾忠中. SMT 可制造性设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

跋

产品设计、产品制造、产品营销是一个公司谋发展、创效益中的三驾马车，三者缺一不可。产品制造是连接产品设计和产品营销间的桥梁。产品设计人员精心设计出来的产品蓝图，只有经过制造人员的精工细作，才能变成制作精良、性价比好、市场竞争力强的商品，并通过产品营销源源不断地供应市场。产品性能先进，质量优良既是设计人员精心设计出来的，也是靠制造人员精雕细刻制造出来的。设计与制造是相辅相成的。俗语说“红花还需绿叶衬”，好的设计理念还必须配备精良的制造技术才能形成有竞争力的商品。制造水平低下，粗制滥造，再好的设计也决不可能被市场接受，“优者胜、劣者亡”，这就是市场对商品的淘汰法则。在选购小型机、电产品方面，人们都愿意选购日本和德国生产的产品，就是因为他们的产品制作精良。

产品制造技术的核心是产品的工艺技术，多年来我国一直流行着“先进的设计，落后的工艺”的说法。这确实映射了我国工业产品（特别是电子产品）生产中所存在的问题。这也正是横在我国由电子制造大国奔向电子制造强国的征途上必须要攻克的堡垒，否则实现世界电子制造强国就是一句空话。美国是世界上第二个发射卫星的国家，就是这种提高国家威望的大事，也曾因为一点小事（焊接）而受到挫折。据说，卫星的发射成功，最终还是多亏了德国的“焊接之神”阿尔宾·威德曼先生的帮助。从此，诞生了美国国家航空航天局（NASA）焊接学校。

广义的工艺技术即产品的制造技术，它包括从产品设计的可制造性（DMF）、可检测性（DMT）、可维修性（DFS）约束、原材料进厂的工艺性要求、加工制造诸元（人、料、机、法、测、环，即5M1E）的优化和控制、对应用环境的防护（即三防）措施等全部加工制造和管理技术的总和。

工艺技术工作是一门为提高企业的劳动生产效率、提高产品制造质量、节能降耗、降低成本、增加利润的综合性的产品制造技术。它是以“时间”、“空间”、“效率”、“能源”等为基础，以对加工制造方法和顺序、生产手段、工作环境、组织机构、人力资源和结构、质量控制等不断优化为研究对象的科学。我们对工艺技术的研究就是为了寻求经济、高效的加工方法去制造某种产品。因此，工艺技术亦是研究优质、高产、低消耗、高利润地生产产品的制造原理和加工方法的一门科学。

工艺技术在科技领域里处于科技成果和生产成品之间，是一个独立的发展阶段。它是将科技成果转化为商品，将设计样品转化为批量生产的产品供应市场的关键和桥梁。采用先进的工艺技术，可直接为企业增加经济效益，提高市场竞争力。

工艺技术是产品制造过程中最活跃的因素，是产品制造质量的技术基础，加强工艺技术的不断进步是提高产品质量的前提。整个产品生产制造过程是以工艺技术为核心的系统工程，各个工序的工艺质量的总和即构成了整个产品的制造质量。

在科学技术高度发展的今天，工艺技术研究越来越被各企业所重视，越来越显示出它的重要性。任何一种新产品的设计或一项新的应用性发明创造都伴随着新的工艺试验研究过程。



国外始终把工艺技术和试验放在突出的位置上,据有关统计资料反映,美国在工业范围内各研究阶段投入的资金和人力比例是:如果基础理论研究为 1,则应用研究为 5,产品开发研究为 20,生产技术研究为 300。也就是说,工艺技术研究投入是产品开发研究的 15 倍。重视不重视工艺研究和试验,直接影响到产品质量的提高和经济效益的增长。我们有些企业采用同一种原料,应用同一种工艺装备,采用大致相同的工艺,然而生产出的产品质量却不同,经济效益也不一样。这里就有一个生产诀窍问题。而生产技术上的诀窍就是加工技术方法,也就是工艺技术中的一种最佳的方案,最佳的工艺参数。这些“关键”和“诀窍”很多是“一点就明,一捅就破”的。然而要想获得它们,就必须经过工艺技术和试验。

中兴通讯是世界级大型通信设备供应商,拥有世界一流、配套完整的生产工艺装备体系,加上公司品种繁多的产品类型,这些都是发展现代电子工艺技术的得天独厚的条件。长期以来,在公司创始人侯为贵董事长的重视下,在公司总裁史立荣先生的关怀下,在执行副总裁邱未召先生的直接领导下,公司的工艺技术与时俱进,不断地发展着。公司的最高领导层始终本着“科技是第一生产力,人才是第一资源”的原则,谋划公司工艺技术和工艺人才的成长。按照“以师带徒,理论与实践结合,干中学,学中干”等模式,一些人已成长为公司工艺技术工作的核心(如研究部的刘哲、制造中心的邱华盛),也有年轻的科技人员已成长为解决产品生产问题的能手(如制造中心工艺部的孙磊和史建卫)。

“欲穷千里目,更上一层楼”,在以侯董事长为首的公司最高层的部署下,公司成立了中兴通讯电子制造职业学院。按照初级、中级和高级的人才培养层次的需要,公司与电子工业出版社合作,共同出版了《现代电子制造系列丛书》,既可作为学院的教材,也可奉献给电子制造业界的同行参考。

中兴通讯《现代电子制造系列丛书》编写组

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任 and 行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

